

钨选区激光熔化应力场的数值模拟

周木华, 赵聪聪

(季华实验室, 广东 佛山 528200)

摘要: 建立了将随温度变化的材料参数特性和相变潜热考虑在内, 用“生死单元”技术模拟铺粉过程的钨选区激光熔化热力耦合有限元模型, 模拟了选区激光熔化过程中成形件的温度场和应力场, 探究了不同基板预热温度和不同支撑结构对成形件残余应力的影响。模拟结果表明, 金属钨在选区激光熔化过程中经历多次加热、冷却过程, 温度分布不均匀。基板预热和施加支撑结构均能减小成形件的残余应力, 当基板预热温度为 1273.15 K 时, 成形件中间节点残余应力减小 118.99 MPa, 减小幅度为 9.96%; 当采用 4 层网格支撑结构时, 成形件中间节点残余应力减小 413.33 MPa, 减小幅度为 34.61%。

关键词: 选区激光熔化; 数值模拟; 残余应力; 基板预热; 支撑结构

中图分类号: TG146.4⁺11

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)02-0490-11

金属钨具有熔点高、硬度高、导电导热性良好和高强度高等优良性能, 在化工、电子、机械工业和航空航天等领域具有广泛应用^[1]。目前成型钨的技术主要有高能率锻造、粉末冶金、化学气相沉积及增材制造, 其中增材制造技术既能避免制备钨过程中的低温脆断, 又能满足制备复杂结构的要求, 逐渐成为钨成型领域的重要技术之一^[2]。增材制造主要包括电子束增材制造、电弧增材制造和激光增材制造, 激光增材制造又包括选区激光熔化成形和激光熔化沉积成形^[3]。目前, 纯钨增材制造的研究中, 绝大多数都是采用选区激光熔化技术^[4]。近年来采用选区激光熔化技术制备钨及钨合金样品取得了较好的研究成果, 目前的研究重点在于如何避免产生裂纹、气孔等缺陷, 提升零件性能^[5]。

选区激光熔化过程中, 材料吸收激光能量后快速熔化, 激光移除后快速凝固冷却, 温度场和应力场变化均十分迅速, 很难通过实验方法实时监控这一过程中成形件温度和应力的变化过程。通过建立有限元模型, 进行参数化热力耦合仿真模拟, 可以更为直观高效地获得成形件温度场和应力场的分布情况。

李会山建立简化的二维非稳态温度场数值模型, 对基体为铝、熔覆层为镍合金的激光熔覆过程温度场进行计算^[6]。Bontha 先后建立 Ti-6Al-4V 激光加工的二维热有限元模型和三维热有限元模型, 研究激光功率和激光速度对冷却速率和热梯度的影响^[7-8]。席明哲和沈显峰等

将随温度变化的材料属性、相变潜热等考虑在内, 分别建立三维有限元模型, 分别对 45 号钢和 25 号钢激光加工过程中的温度分布进行计算^[9-11]。龚丞、赵亮和 Wang 等^[12-18]多名学者分别建立铁、钴基合金等的激光加工三维有限元模型, 分析激光功率、扫描速度等工艺参数对温度分布和残余应力的影响, 为降低激光增材制造成形件的残余应力和优化工艺参数提供指导。伍方等^[19]通过激光单道扫描成型纯钨薄壁件, 研究激光功率和激光扫描速率对成形件壁厚、熔化道宽度和表面形貌的影响。陈德宁、Cheng 和 Song 等^[20-23]通过仿真模拟及试验验证分别研究 Ti-6Al-4V 和 In718 选区激光熔化过程中多种扫描策略对温度分布和残余应力的影响, 结果表明扫描策略不仅对温度场影响较大, 对样品残余应力也有影响。龙日升和卞宏友等^[24-26]分别通过建立对基板进行预处理的 Ni60A 和 GH4169 激光加工的三维有限元模型, 计算表明基板预热能够降低残余应力。杨益、Mertens 和 Norbert 等^[27-29]也通过实验分别对钛铝合金、铝 7075 合金、AISI H10 等的选区激光熔化过程进行了研究, 表明基板预热能够降低选区激光熔化成形件的残余应力, 还能在一定程度上减少裂纹产生。廖英岚^[30]通过研究发现 GH4169 选区激光熔化中, 不同的支撑结构对不同高度试样的残余应力存在不同影响。鞠洪涛等^[31]建立 Ti-6Al-4V 电弧熔丝增材与层间辊轧复合成形的有限元模型, 模拟结果表明层间辊轧能降低成形件的残余应力。

收稿日期: 2023-04-11

基金项目: 国家自然科学基金 (52001135)

作者简介: 周木华, 女, 1997 年生, 硕士, 季华实验室, 广东 佛山 528200, E-mail: zhoumh@jihualab.com

成形件内部的残余应力是导致发生变形、开裂的根本原因,降低成形件残余应力是选区激光熔化成形工艺亟待解决的问题之一。金属钨的熔点高,在选区激光熔化成形过程中需要极高的温度,温度、应力变化复杂,仿真模拟是一种可以快速预测和获得成形件温度和应力变化情况的有效手段。Vrancken 等人^[32]利用有限元模拟了激光熔化非铺粉单道纯钨的温度场及应力场。Shi 等人通过数值模拟得到钨薄壁件在选区激光熔化过程中的温度分布和变形情况^[33]。但目前,对于选区激光熔化成形钨及其合金温度场及应力场的模拟较少,并且多为对单道成形进行模拟,对钨进行多道多层选区激光熔化的温度场和应力场数值模拟较少。本研究将随温度变化的钨参数特性和相变潜热考虑在内,采用“生死单元”技术模拟铺粉过程,建立三维仿真模型,对钨选区激光熔化成形多道多层扫描过程进行数值模拟,分别计算不同温度基板预热、施加不同支撑结构(包括支撑结构形状及高度),及同时进行基板预热处理和施加支撑结构的情况下,金属钨成形件在选区激光熔化过程中的温度场分布和应力场分布。研究基板预热温度及支撑结构对降低选区激光熔化成形钨残余应力的作用,探究降低成形件残余应力的方法。

1 有限元模型的建立

数值模拟过程中的几何模型由两部分组成,其中,基板尺寸为 6.9 mm×6.9 mm×0.5 mm,成形件模型尺寸为 0.9 mm×0.9 mm×0.12 mm,基板与成形件的材料均为钨。

为了保证计算结果的准确性、缩短计算时间,在进行网格划分时,成形件模型采用六面体网格,网格尺寸较小,基板采用四面体网格,网格尺寸随着与成形件距离增大而增大,网格划分结果如图 1 所示。其中 A 点坐标为 (0.45、0.45 mm), B 点坐标为 (0、0.45 mm), C 点坐标为 (0.45、0 mm)。数值模拟中采用的选区激光熔化成形工艺参数如表 1 所示。激光扫描方式为每一层移动路径都与前一层呈 67° 夹角。

选区激光熔化成形过程中,在基板上逐层铺粉,并以特定的扫描方式对粉末进行逐层扫描。为了更真实地还原增材制造过程,采用“生死单元”技术模拟逐层铺粉。使表征未铺设粉末的单元处于被“杀死”状态,即将单元刚度矩阵乘上一个很小的系数,使得死单元的载荷被设定为零,不对总载荷产生影响^[34]。随着铺粉完成,逐层激活单元。

在选区激光熔化成形数值模拟过程中,热源模型的选择将影响到模拟的准确性。典型的热源模型有 Rosenthal 热源模型、高斯热源模型和双椭球热源模型。Rosenthal 热源模型的假设条件较多,模拟结果与真实值相比误差

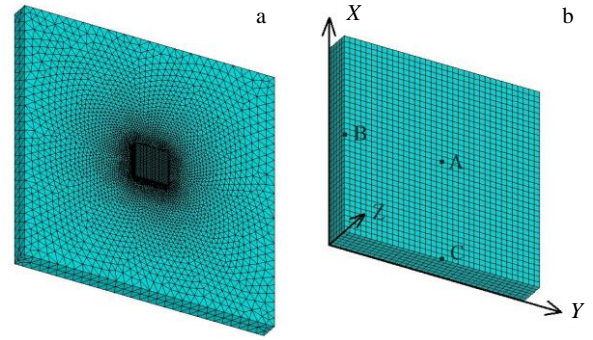


图 1 整体和成形件的网格划分结果

Fig.1 Meshing results of the whole (a) and the formed (b) part

表 1 数值模拟工艺参数

Table 1 Process parameters of simulation

Power/W	Speed/mm s ⁻¹	Scan spacing/ μm	Powder thickness/ μm	Powder time/s
350	400	100	20	30

较大^[35]。相较于高斯热源,双椭球热源考虑了激光能量在粉末中的扩散,更好地反映了材料熔化过程中的温度场变化和熔池尺寸,计算结果的准确性较高^[36]。所以本文采用双椭球热源模型模拟选区激光熔化成形中的激光热源。

双椭球热源模型分别用 2 个不同的表达式来描述前后热源。前半椭球的表达式如下:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}\eta f_t q_0}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_f^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (1)$$

后半球的表达式如下:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}\eta f_b q_0}{abc_b \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_b^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c_f 、 c_b 为热源模型的形状参数 (m); q_0 为激光功率 (W); η 为激光吸收率; f_t 、 f_b 为模型前后椭球的能量分配系数。 a 是表征熔池宽度的参数, b 是表征熔池深度的参数, c_f 和 c_b 分别是表征椭球前半部分长度和后半部分长度的参数。

通过实验得到,在激光功率为 350 W、激光移动速度为 400 mm/s 时,熔池深度为 104 μm ,熔池宽度为 113 μm 。本次模拟中取 $f_t=0.6$, $f_b=1.4$, a 取实际熔池宽度的一半, b 取实际熔池深度,前半球长度参数取值为熔池宽度的一半,后半球长度参数取值为熔池宽度的 2 倍^[37],即 $a=56.5 \mu\text{m}$, $b=104 \mu\text{m}$, $c_f=56.5 \mu\text{m}$, $c_b=226 \mu\text{m}$ 。

本文建立的有限元模型考虑了随温度变化的材料属性和相变潜热的非线性效应,并通过计算效率较高的热焓法^[38]处理相变潜热问题。钨随温度变化的材料参数^[39]如表 2 所示。

表 2 钨的材料参数

Table 2 Material parameters of tungsten

Temperature/K	Coefficient of thermal expansion/ $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Temperature/K	Heat capacity/J (kg K) $^{-1}$	Thermal conductivity/W (m K) $^{-1}$
300	4.49	300	130.33	174
600	4.75	500	136.85	146
1000	5.02	1000	145.23	118
1400	5.46	1500	152.96	100
1800	6.11	2000	162.10	-
2200	6.89	2500	171.89	-
2600	7.76	3000	195.33	-
3000	9.05	3500	228.46	-
3400	11.60	3600	239.34	-
-	-	3693	193.45	-

选区激光熔化过程中，热量通过热传导、热对流和热辐射等方式在成形件、基板和环境之间传递，该过程的传热方程^[40]可表示为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (3)$$

式中， ρ 为密度 (kg/m³)； c 为比热容 (J/(kg K))； κ 为热导率 (W/(m K))； t 为时间 (s)； T 为温度 (K)； Q 为热量 (J)。

成形件和基板的散热方式主要为对流换热和热辐射，所以采用综合换热系数 h ^[41]：

$$h = \varepsilon \sigma (T + T_\infty)(T^2 + T_\infty^2) + \delta \quad (4)$$

式中， ε 为材料的辐射率； σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$)； T 为材料边界的温度 (K)； T_∞ 为环境温度 (K)； δ 为对流换热系数 (W/(m² K))。

选区激光熔化的应力场模拟分析中，采用 Von Mises 屈服准则。在一定的变形条件下，当材料的单位体积形状改变的弹性形变能达到某一数值时，材料开始进入塑性状态。屈服准则可以用等效应力表示，等效应力可表示为：

$$\sigma = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (5)$$

式中， σ_1 为第一主应力 (Pa)， σ_2 为第二主应力 (Pa)， σ_3 为第三主应力 (Pa)。

等效应变可表示为：

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (6)$$

式中， ε_1 为第一主应变， ε_2 为第二主应变， ε_3 为第三主应变， μ 为泊松比。

2 温度场模拟结果分析

计算得到金属钨在选区激光熔化过程中的温度场变化，在进行第 1 层成形件扫描过程中，当扫描时间为

0.010 375 s 时（即热源处于成形件的中心位置），基板与成形件的温度分布如图 2 所示。

由图 2 可以看出，在热源扫描过程中，高温区域沿着扫描路径分布，越靠近热源中心位置的温度越高。热源呈近似椭圆形形状沿扫描路径移动，相较于热源前端，热源后端的等温线较为稀疏，加热范围较大，温度梯度较小，这是由热源移动过程中的热量累积所导致的。在选区激光熔化过程中，金属钨的温度分布梯度很大，最高温度达到 5989.24 K，超过钨的熔点，最低温度只有 293.15 K。

选取成形件第 1 层上表面的中间节点 A1，提取其在热源移动过程中的温度变化，结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出，节点 A1 经历多次加热、冷却的过程，这是因为前序热源扫描对节点 A1 位置的材料有一定预热作用，后续热源扫描又有重新加热作用，形成热循环。在进行第一层扫描时，热源移动到节点 A1 的位置，该点的温度快速升高，最高温度达到 6035.03 K，

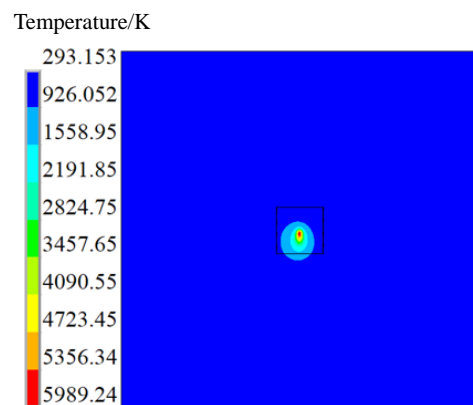


图 2 整体的温度分布

Fig.2 Temperature distribution of the whole

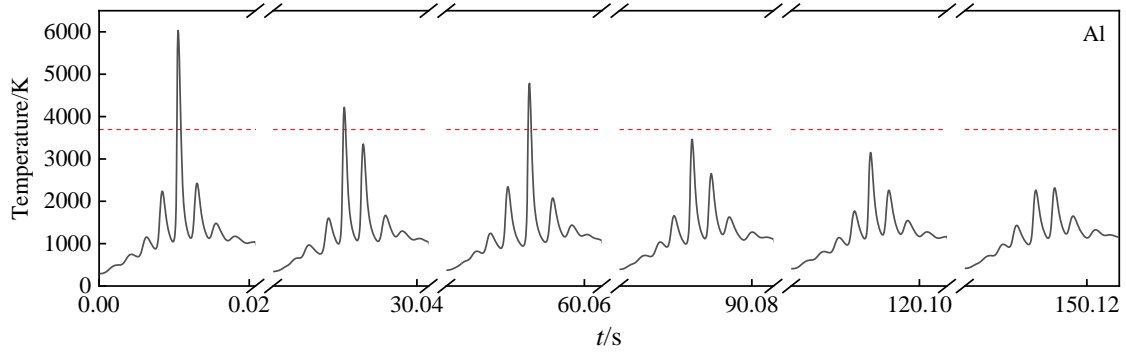


图 3 节点 A1 温度变化

Fig.3 Changes of A1 node temperature

远超过金属钨的熔点, 当热源离开后, 节点 A1 的温度迅速下降。在这个过程中节点 A1 位置的粉末经历了快速加热熔化、冷却凝固的过程。选区激光熔化过程中, 成形件的温度场分布不均匀, 变化复杂且迅速。节点 A1 的温度曲线与江静^[42]等人对钨电子束选区熔化过程中的温度场进行模拟, 得到的热循环曲线变化趋势一致。

当热源进行第 2 层、第 3 层扫描时, 节点 A1 的最高温度依旧出现了超过金属钨熔点的情况, 材料发生重熔。成形件每层的热源扫描路径不同, 导致出现进行第 3 层热源扫描时, 节点 A1 与热源中心的最小距离小于第 2 层扫描的情况, 所以第 3 层扫描时的最高温度大于第 2 层扫描。在热源进行第 4~6 层扫描时, 节点 A1 与热源中心的距离较大, 虽然还会出现被加热的情况, 但

最高温度始终小于金属钨的熔点, 材料没有发生重熔情况。

3 应力场模拟结果分析

在选区激光熔化过程中, 温度分布不均匀是影响应力场的主要因素, 但是应力对温度场的影响几乎可以忽略不计, 所以采用热力间接耦合的方法进行数值模拟。将计算得到的温度场结果作为载荷, 进行应力场模拟。

热源扫描完成时和冷却 1000 s 后, 成形件的应力分布和温度分布如图 4 所示。在冷却过程中, 成形件的应力明显增大, 且成形件右上角区域的应力增大情况尤为明显, 因为成形件温度分布不均匀, 热源最后扫描的位置即为成形件的右上角, 此时, 成形件坐标为 (0.9 mm,

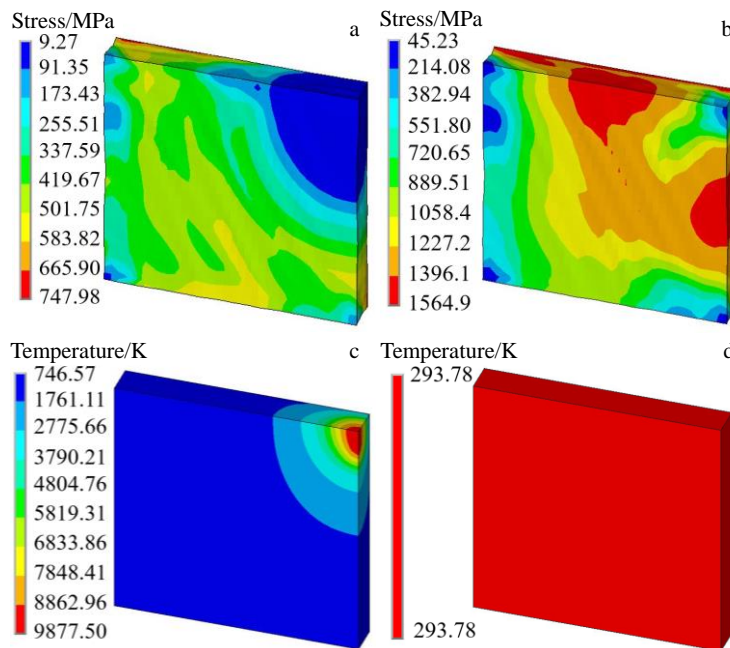


图 4 扫描完成时和冷却 1000 s 后成形件的应力、温度分布

Fig.4 Stress (a-b) and temperature (c-d) distributions of the formed part after completed scanning (a, c) and cooling for 1000 s (b, d)

0.9 mm) 位置附近的温度较高, 经历快速冷却后发生收缩, 但收缩受到周围材料的约束, 导致较大应力产生。

分别提取节点 A1、B1 (B 位置处第一层节点) 和 C1 (C 位置处第一层节点) 在热源扫描过程中的等效应力, 并将节点的等效应力变化与温度变化进行对比。结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 在热源扫描过程中, 节点应力与温度呈负相关, 当节点温度减小时, 节点应力增大; 当节点温度增大时, 节点应力减小。这是由于随着温度的升高, 材料的屈服强度下降, 当材料的屈服强度下降至小于应力时, 材料发生塑性变形, 应力释放。彭刚勇^[34]对钛合金选区激光熔化进行温度场和应力场数值模拟得到的热循环曲线和热应力循环曲线同样呈现出负相关关系。

在每一层扫描起始时, 节点的应力均大于上一层扫描结束时的应力, 这是因为在铺粉过程中, 没有热源作用, 成形件的温度迅速下降, 导致应力增大。在选区激光熔化过程中, 节点经过多次加热、冷却过程, 形成热循环, 导致节点热应力循环的产生。当节点温度超过金属钨的熔点, 材料由固态转变为液态, 此时, 节点的应力值极小。

3.1 预热温度对应力场的影响

选区激光熔化成形过程中, 温度分布不均匀和冷却速度快是导致残余应力大的主要原因, 通过对基板进行预热处理, 可以在一定程度上调整温度分布, 从而对成形件的残余应力产生影响。本文对不同温度的基板预热处理进行数值模拟, 并获取成形件的残余应力和 Von Mises 塑性应变。预热温度分别为 473.15、673.15、723.15、773.15、823.15 和 1273.15 K。

分别获取成形件边缘位置 (B 点、C 点) 与中间位置 (A 点) 的残余应力和 Von Mises 塑性应变, A、B 与 C 点具体位置如图 1 所示。将不进行预热处理与不同温度预热处理下经过 1000 s 冷却后的各节点残余应力和 Von Mises 塑性应变进行对比, 结果如图 6 所示, 其中 B1~B6 分别为 B 点位置 1~6 层的节点, 节点 A1~A6 与节点 C1~C6 同理。

由图 6 可以看出除成形件边缘位置第一层节点外, 其余节点的残余应力均随着基板预热温度的增大而减小。其中, 在无预热情况下, 节点 A6 的残余应力为 1393.46 MPa, 节点 A1 的残余应力为 1267.72 MPa, 在对基板进行 1273.15 K 预热处理后, 节点 A6 的残余应力

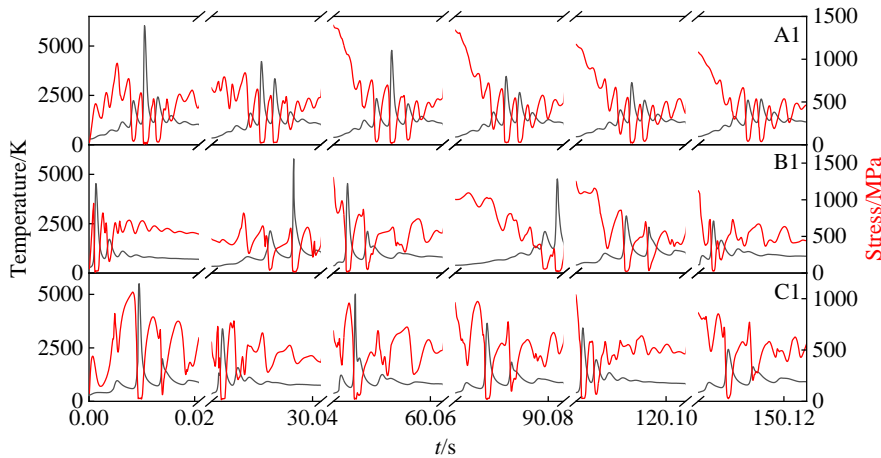


图 5 节点温度、应力对比

Fig.5 Comparison of nodal temperature and stress

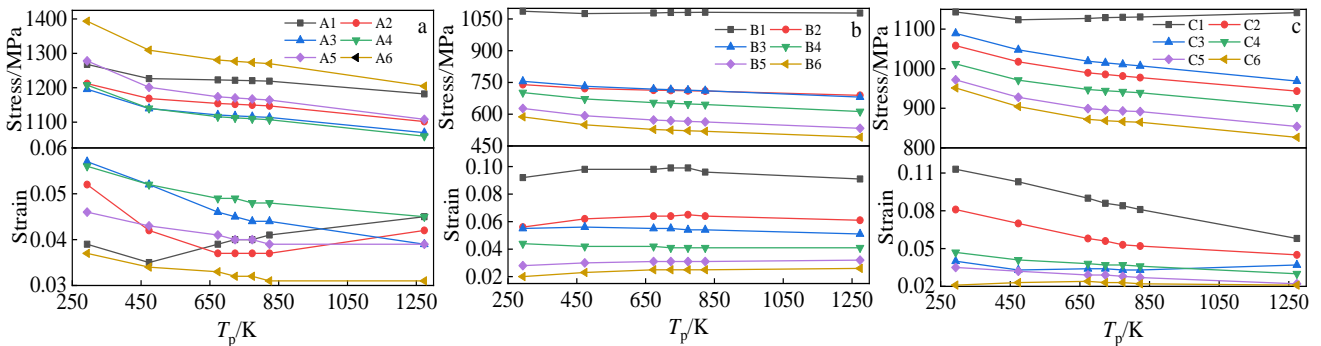


图 6 不同预热温度节点应力、应变对比

Fig.6 Comparisons of nodal stress and strain at different preheating temperatures: (a) node A, (b) node B, and (c) node C

为 1204.60 MPa, 节点 A1 的残余应力为 1181.95 MPa, 减小量分别为 188.86 MPa 和 85.77 MPa, 减小幅度分别为 13.55% 和 7.26%。

从无预热到预热温度为 473.15 K 时, 残余应力的减小趋势最为明显, 随着预热温度的增大, 残余应力虽然还在减小, 但减小的趋势逐渐变缓。李红涛^[43]对镁合金选区激光熔化进行温度场和应力场模拟时, 也得出基板预热能够降低热应力和残余应力的结论, 对基板进行 80 °C 预热处理后, 残余应力最大值由 129 MPa 减小到 99.1 MPa。

B 位置处的节点应变在 0.02~0.1 范围内, C 位置处的节点应变在 0.02~0.12 范围内, A 位置处的节点应变在 0.03~0.06 范围内, 节点 C1 和节点 C2 的应变随着基板温度增加而减小, 其余节点的应变变化不明显。

分别选取成形件 $x=0.45\text{ mm}$ 与 $y=0.45\text{ mm}$ 路径上的节点 (即成形件的中间位置), 将其不同基板预热温度下经过 1000 s 冷却后的残余应力进行对比, 结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出 x 方向、 y 方向路径上节点的残余应力均随基板预热温度的增大而减小, 其中, 位于 $x=0.45\text{ mm}$, $y=0.45\text{ mm}$ 位置处的节点, 在无预热情况下的残余应力为 1194.30 MPa, 基板预热温度为 473.15 K 时残余应力为 1139.40 MPa, 残余应力减小 54.9 MPa, 减小幅度为 4.60%; 基板预热温度为 1273.15 K 时残余

应力为 1075.31, 残余应力减小 118.99 MPa, 减小幅度为 9.96%。且相较于边缘节点, 中间节点残余应力的减小趋势更为明显。相较于 x 坐标值小位置处的节点, x 坐标值大位置处节点的残余应力较大, y 轴方向也出现相同情况, 这种现象是由扫描路径导致。

在进行第 6 层 (最后一层) 扫描时, 热源从 x 坐标、 y 坐标较小位置向 x 坐标、 y 坐标较大位置移动。因此 x 坐标与 y 坐标较小位置处的材料经历高温熔化、冷却后, 移动的热源对材料有重复加热作用, 应力得到一定程度上的释放, 所以 x 坐标与 y 坐标较小位置处的应力较小。

3.2 支撑结构对应力场的影响

选区激光熔化过程中, 金属钨经历热循环, 在快速熔化凝固过程中, 成形件发生变形, 基板对成形件的约束作用影响力场的分布。在基板与成形件之间增加不同的支撑结构, 对成形件产生的约束作用也不同, 从而对成形件的应力场产生不同影响。同时, 支撑结构还会影响热源扫描和冷却过程中, 成形件与基板之间的热传导, 对成形件的温度场分布产生影响。通过建立不同支撑结构的模型, 模拟分析支撑结构对成形件残余应力的影响。

本文建立了网格支撑、条纹支撑、轮廓支撑的模型, 模型结构如图 8 所示。3 种支撑结构的宽度均与热源扫描间距相等, 即为 100 μm , 其中网格支撑存在搭接

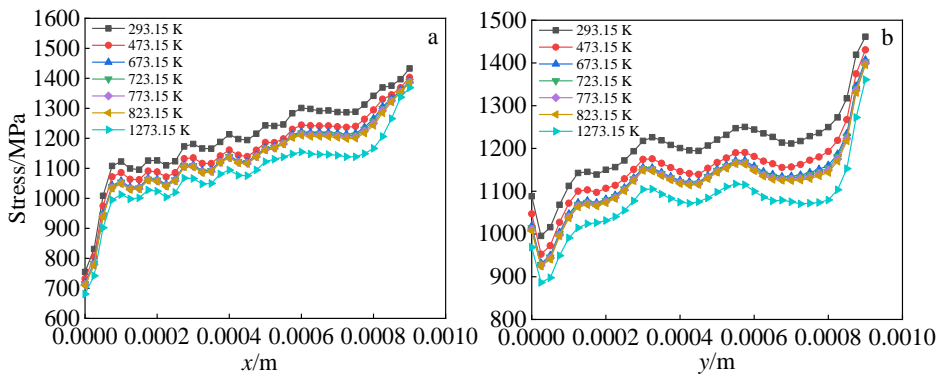


图 7 不同预热温度节点应力对比

Fig.7 Comparison of nodal stress at different preheating temperatures: (a) nodes in the third layer in x direction and (b) nodes in the third layer in y direction

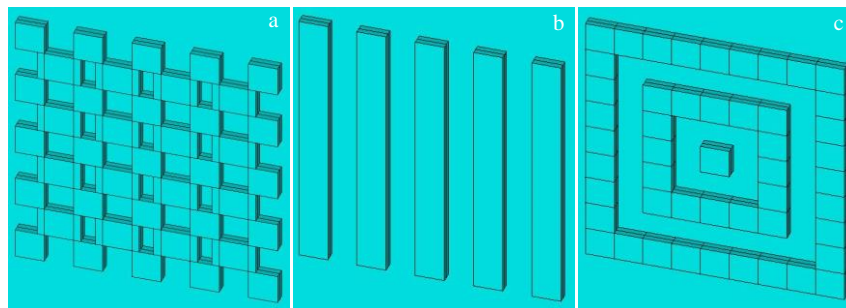


图 8 支撑结构模型

Fig.8 Supporting structure models: (a) grid support, (b) striped support, and (c) contour support

区域，支撑结构的高度均与成形件两层铺粉的高度相等，即为 40 μm。

分别选取成形件 $x=0.45\text{ mm}$ 与 $y=0.45\text{ mm}$ 路径上的节点，将其不同支撑结构下经过 1000 s 冷却后的残余应力进行对比，结果如图 9 所示。由图可以看出，支撑结构对节点残余应力的减小作用较为明显。其中，位于 $x=0.075\text{ mm}$ ， $y=0.45\text{ mm}$ 位置处的第 3 层节点，在增加网格支撑结构下的残余应力减小幅度最大。无支撑结构时，该节点的残余应力为 1107.80 MPa，增加网格支撑后，该节点的残余应力为 535.88 MPa，残余应力的减小量为 571.92 MPa，减小幅度达 51.63%。不同支撑结构的减小作用存在差异，就整体而言，相较于条纹支撑和轮廓支撑，网格支撑结构对残余应力的减小效果最为显著。肖中旭^[44]对 Ti6Al4V 选区激光熔化成形进行的应力研究也证实添加支撑结构能够有效降低应力，研究中应力最大平均降幅达 28%。

增加支撑结构对不同位置节点应力的减小作用也有所不同。与基板预热处理相同，相较于边缘节点，中间节点残余应力的减小趋势更为明显。增加支撑结构后， $y=0.45\text{ mm}$ 路径上节点的应力大小呈波浪状分布。这种

情况由支撑结构导致，成形件与支撑结构相接位置的受到支撑结构的约束作用较强，应力较大，与基板分离位置受到的约束作用大大减小，应力较小。与支撑结构距离越小的位置，这种情况越明显。 $x=0.45\text{ mm}$ 路径上，增加网格支撑和轮廓支撑后，节点应力也出现该情况，由于 $x=0.45\text{ mm}$ 路径上节点所在位置均与条纹结构相接，所以增加条纹结构并未出现该情况。

支撑高度不同对成形件与基板之间热传导的影响也不同，建立支撑高度与成形件 4 层铺粉高度相等的模型，即支撑高度为 80 μm，并进行热力耦合模拟，得到成形件各个位置的残余应力。提取成形件 $y=0.45\text{ mm}$ 与 $x=0.45\text{ mm}$ 路径上经过 1000 s 冷却后的的节点残余应力，3 种支撑结构条件下的结果如图 10~12 所示（含节点位置正下方的支撑结构图）。

由图 10~图 12 可以看出，无论是网格支撑、条纹支撑还是轮廓支撑，支撑高度为 4 层铺粉高度时， $y=0.45\text{ mm}$ 与 $x=0.45\text{ mm}$ 路径上节点应力随坐标值变化的变化趋势与支撑高度为 2 层铺粉高度时近乎相同。相较于 2 层支撑，4 层支撑的节点应力有所减小。因为支撑结构高度增大，成形件与基板之间的热传导作用减弱，成形件的

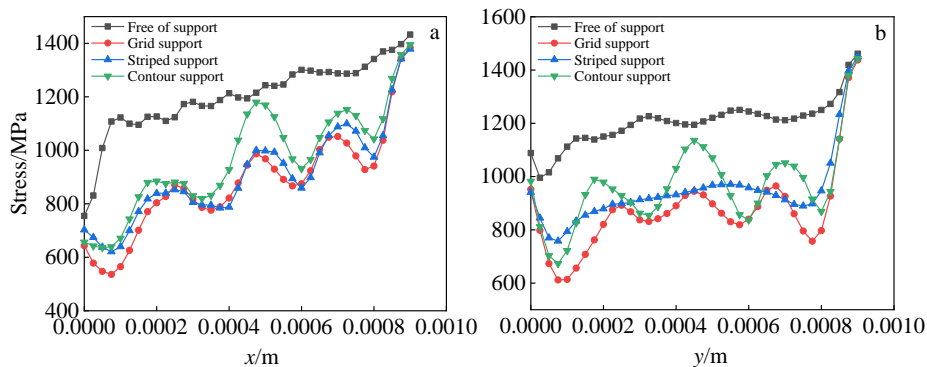


图 9 不同支撑结构节点应力对比

Fig.9 Comparisons of nodal stress of different support structures: (a) nodes in the third layer in x direction and (b) nodes in the third layer in y direction

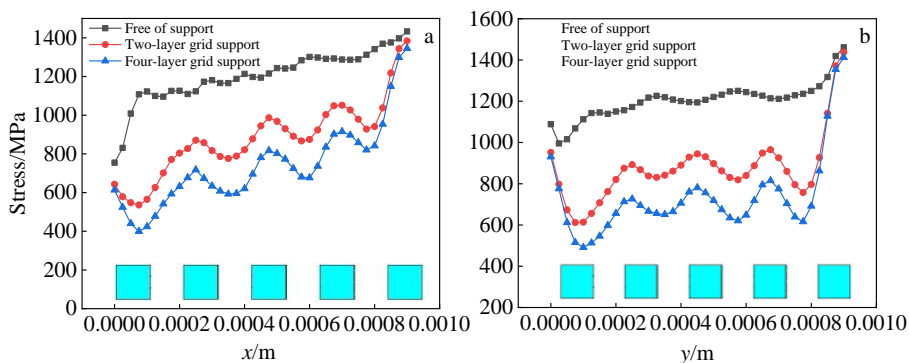


图 10 不同高度网格支撑节点应力对比

Fig.10 Comparisons of nodal stress of grid support with different heights: (a) nodes in the third layer in x direction and (b) nodes in the third layer in y direction

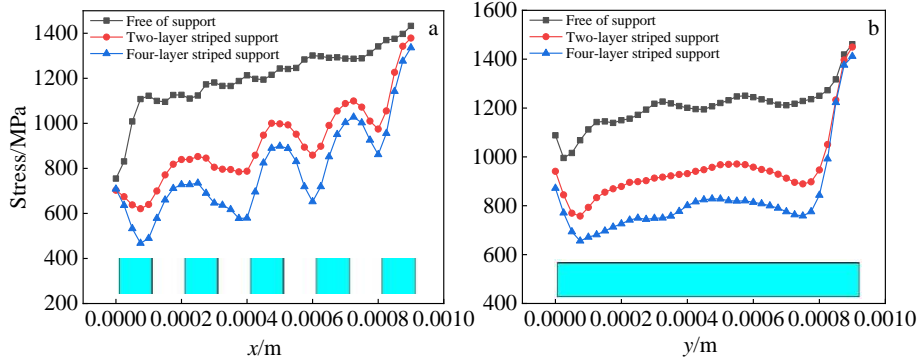


图 11 不同高度条纹支撑节点应力对比

Fig.11 Comparisons of nodal stress of striped support with different heights in the third layer in x direction (a) and y direction (b)

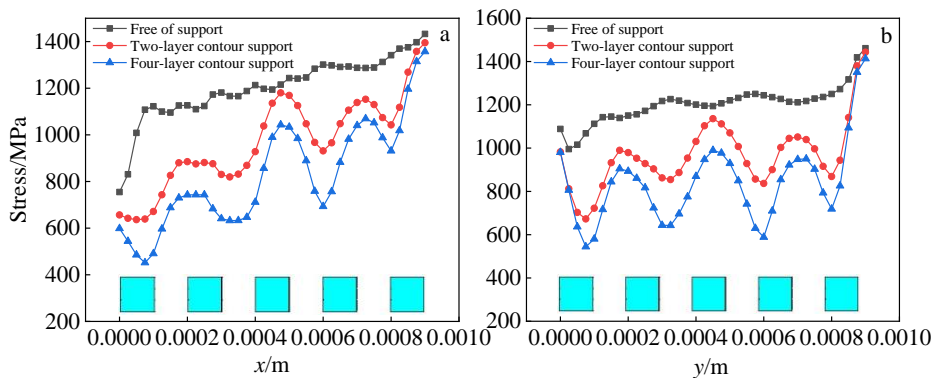


图 12 不同高度轮廓支撑节点应力对比

Fig.12 Comparisons of nodal stress of contour support with different heights in the third layer in x direction (a) and y direction (b)

冷却速度减缓, 导致残余应力减小。

但整体而言, 4 层支撑与 2 层支撑之间的应力减小量明显小于两层支撑与无支撑之间的应力减小量。以位于 $x=0.45\text{ mm}$, $y=0.45\text{ mm}$ 处的第 3 层节点为例, 其在没有支撑结构时的残余应力为 1194.30 MPa , 在施加 2 层网格支撑时的残余应力为 944.55 MPa , 残余应力减小量为 249.75 MPa , 减小幅度为 20.91% 。其在施加 4 层网格支撑时的残余应力为 780.97 MPa , 残余应力减小量为 413.33 MPa , 相较于施加 2 层网格支撑, 残余应力减小量为 163.58 MPa , 减小幅度为 17.32% 。

由此可以看出, 在一定的高度范围内, 支撑高度增加, 能够起到减小成形件残余应力的作用, 但是随着支撑高度增加, 残余应力的减小趋势越来越不明显。

3.3 基板预热和支撑结构对应力场的影响

由上文可知, 对基板进行预热处理和和在基板与成形件之间增加支撑结构均能够起到减小成形件残余应力的作用。选取基板预热温度为 673.15 K 与 2 层网格支撑结构, 将两种能够起到减小残余应力的方法相结合, 建立有限元仿真模型, 计算成形件的残余应力。

取成形件 $y=0.45\text{ mm}$ 与 $x=0.45\text{ mm}$ 路径上的节点,

将其在无预热无支撑、 673.15 K 预热、2 层网格支撑和同时施加 673.15 K 预热与 2 层网格支撑情况下经过 1000 s 冷却后的残余应力进行对比, 结果如图 13 所示。

由图 13 可以看出, 在基板和成形件之间增加网格支撑结构对成形件残余应力的减小作用比对基板进行 673.15 K 预热处理明显。相对于只对基板进行预热处理或是只增加支撑结构, 同时进行基板预热和增加支撑结构对成形件残余应力的减小作用更为明显。以位于 $x=0.45\text{ mm}$, $y=0.45\text{ mm}$ 处的第 3 层节点为例, 其在没有支撑结构时的残余应力为 1194.30 MPa , 在进行基板预热后的残余应力为 1121.20 MPa , 减小幅度为 6.12% ; 在施加 2 层网格支撑后的残余应力为 944.55 MPa , 减小幅度为 20.91% ; 同时进行基板预热与施加网格支撑后的残余应力为 864.56 MPa , 减小幅度为 27.61% 。

将基板预热处理后的残余应力减小量与增加网格支撑后的残余应力减小量相加, 得到应力减小量 1, 与同时进行基板预热和增加网格支撑结构后的应力减小量 2 进行对比, 结果如图 14 所示。

由图 14 可以看出, 就成形件第 3 层而言, 无论是

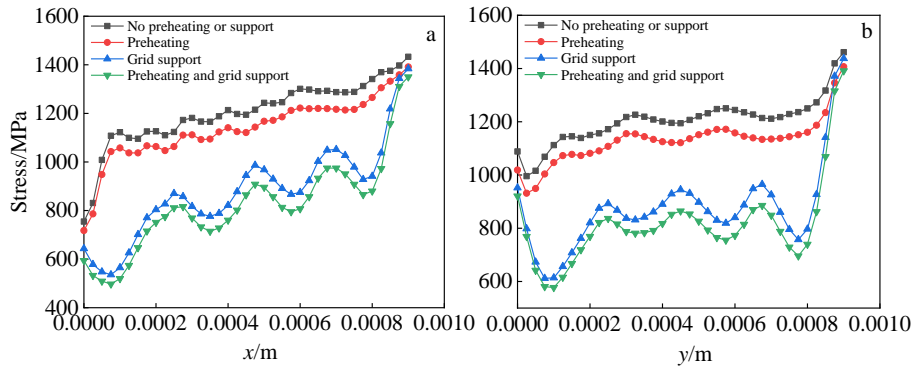


图 13 不同处理方法下节点应力对比

Fig.13 Comparisons of nodal stress of different treatment methods in the third layer in x direction (a) and y direction (b)

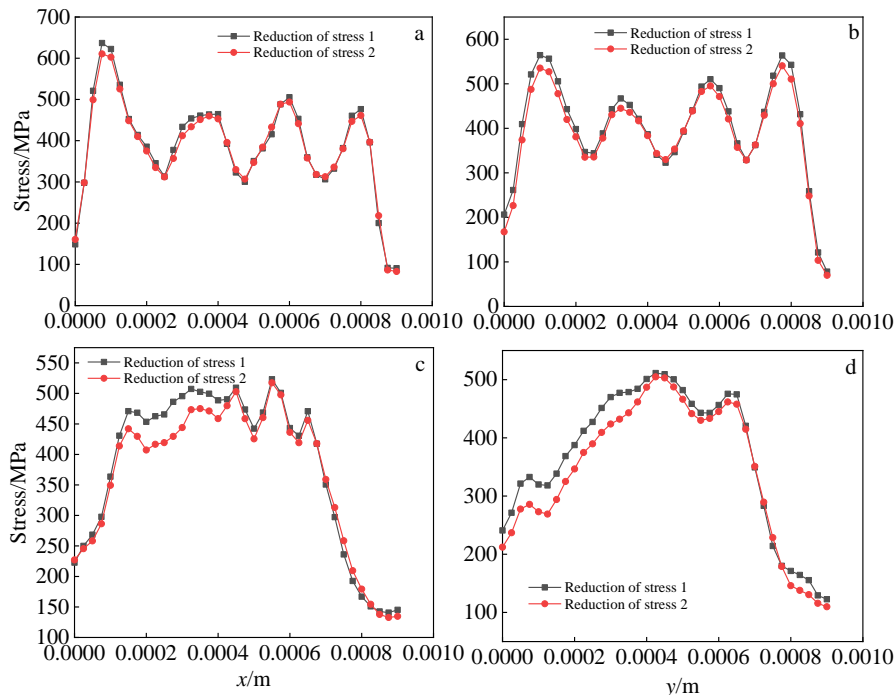


图 14 节点应力减小量对比

Fig.14 Comparisons of nodal stress reduction: (a) nodes in the third layer in x direction, (b) nodes in the third layer in y direction, (c) nodes in the sixth layer in x direction, and (d) nodes in the sixth layer in y direction

$y=0.45\text{ mm}$ 路径还是 $x=0.45\text{ mm}$ 路径上的节点, 应力减小量 1 与应力减小量 2 之间的差距很小。就成形件第 6 层而言, 部分节点的应力减小量 2 略小于应力减小量 1。由此可见, 对于接近基板的成形件, 同时进行基板预热处理和增加支撑结构对应力减小作用近似于对成形件分别进行这两种处理方法的叠加作用; 对于距基板较远的打印层, 同时进行基板预热和增加支撑结构对应力减小作用略小于这两种减小应力措施的叠加作用。这是由于增加支撑结构后, 成形件与基板之间的热传导作用减弱, 距基板较远的打印层与基板之间的距离进一步增大, 基板预热对温度分布的影响作用减弱。

同时, 由第 3 层的应力减小量 2 的分布趋势, 也可

以看出, 相较于与支撑结构相连位置, 处于与基板分离位置的节点应力减小作用更为明显。

4 结 论

1) 实施基板预热有利于减小成形件残余应力, 且随基板预热温度增加, 残余应力水平逐渐减小。相比于无预热样品, 当预热温度为 473.15 K 时, 成形件中间节点残余应力减小 54.90 MPa , 当预热温度为 1273.15 K 时, 成形件中间节点残余应力减小 118.99 MPa 。

2) 在基板与成形件之间增加支撑结构, 有利于减小残余应力。在一定范围内, 随着支撑结构高度增大, 残余应力水平逐渐减小。相比于无支撑样品, 当采用

两层网格支撑结构时, 成形件中间节点残余应力减小 249.75 MPa, 当采用 4 层网格支撑结构时, 成形件中间节点残余应力减小 413.33 MPa。

3) 当同时施加基板预热并采用支撑结构时, 两者减小残余应力的效果叠加, 但随着打印层数的增加, 由于基板与成形件之间的热交换受支撑结构影响, 基板预热对于残余应力的减小效果逐渐削弱。

参考文献 References

- [1] Deng Cheng(邓澄), Jiang Menglong(蒋梦龙), Zhou Shengfeng(周圣丰) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2022, 42(7): 804
- [2] Yan Dongfang(闫东方), Shi Chuanwei(史传伟), Wang Xibao(王希保) et al. *Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2021, 51(8): 93
- [3] Wan Hongyuan(万宏远), Liu Zhuangzhuang(刘壮壮), Han Quanquan(韩泉泉) et al. *Aeronautical Science & Technology*(航空科学技术)[J], 2022, 33(9): 26
- [4] Wu Fang(伍方). *Research on Forming Technology of Pure Tungsten Material by Selective Laser Melting*(选择性激光熔化纯钨材料的成形技术研究)[D]. Shanghai: Shanghai University, 2021
- [5] Ding Xiaoyu(丁笑瑜), Yin Yanjun(尹衍军), Guan Jieren(关杰仁) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(6): 2237
- [6] Li Huishan(李会山), Yang Xichen(杨洗陈), Wang Yunshan(王云山) et al. *Journal of Tiangong University*(天津工业大学学报)[J], 2003(5): 9
- [7] Bontha S, Klingbeil N W, Kobryn P A et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 178(1-3): 135
- [8] Bontha S, Klingbeil N W, Kobryn P A et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 513-514: 311
- [9] Xi Mingzhe(席明哲), Yu Gang(虞钢). *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2004(12): 1527
- [10] Shen Xianfeng(沈显峰), Yao Jin(姚进), Wang Yang(王洋) et al. *Journal of Optoelectronics Laser*(光电子激光)[J], 2005(4): 492
- [11] Shen Xianfeng(沈显峰), Yao Jin(姚进), Wang Yang(王洋) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2006(8): 78
- [12] Zhang Wenxian(章文献), Shi Yusheng(史玉升), Li Jiagui(李佳桂) et al. *Applied Laser*(应用激光)[J], 2008(3): 185
- [13] Cheng Guangping(程广萍), Li Mingxi(李明喜), He Yizhu(何宜柱) et al. *Heat Treatment*(热处理)[J], 2009, 24(4): 49
- [14] Du Yang(杜洋), Qiao FengBin(乔凤斌), Guo Lijie(郭立杰) et al. *Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2018, 48(8): 34
- [15] Gong Cheng(龚丞), Wang Lifang(王丽芳), Zhu Gangxian(朱刚贤) et al. *Laser Technology*(激光技术)[J], 2019, 43(2): 263
- [16] Wang Lifang(王丽芳), Sun Yaxin(孙亚新), Zhu Gangxian(朱刚贤) et al. *Applied Laser*(应用激光)[J], 2019, 39(3): 376
- [17] Zhao Liang(赵亮), Wang Lifang(王丽芳), Zhu Gangxian(朱刚贤) et al. *Applied Laser*(应用激光)[J], 2021, 41(2): 366
- [18] Wang L, Jiang X, Zhu Y et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 97(9-12): 3535
- [19] Wu Fang(伍方), Sun Zhonggang(孙中刚), Li Bangyi(李邦悻) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(10): 3490
- [20] Chen Dening(陈德宁), Liu Tingting(刘婷婷), Liao Wenhe(廖文和) et al. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2016, 43(4): 74
- [21] Cheng B, Shrestha S, Chou Y K. *Additive Manufacturing*[J], 2016, 12: 240
- [22] Song J, Wu W, Zhang L et al. *Optik*[J], 2018, 170: 342
- [23] Wang Wen(王稳), Zhao Zengya(赵增亚), Zhang Shengyong(张生永) et al. *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2020, 57(5): 156
- [24] Su Ronghua(苏荣华), Liu Weijun(刘伟军), Long Risheng(龙日升). *Manufacturing Technology & Machine Tool*(制造技术与机床)[J], 2009(4): 78
- [25] Long Risheng(龙日升), Liu Weijun(刘伟军), Xing Fei(邢飞) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2009, 45(10): 241
- [26] Bian Hongyou(卞宏友), Zhai Quanxing(翟泉星), Qu Shen(曲伸) et al. *Applied Laser*(应用激光)[J], 2017, 37(3): 327
- [27] Mertens R, Dadbakhsh S, Van Humbeeck J et al. *Procedia CIRP*[J], 2018, 74: 5
- [28] Yang Yi(杨益), Dang Mingzhu(党明珠), Li Wei(李伟) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2020, 56(3): 181
- [29] Wild N, Giedenbacher J, Huskic A et al. *Procedia Computer Science*[J], 2022, 200: 1274
- [30] Liao Yinglan(廖英岚). *Thesis for Master*(硕士论文)[D], Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017
- [31] Ju Hongtao(鞠洪涛), Xu Dongsheng(徐东生), Shan Feihu(单飞虎) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(3): 878
- [32] Bey V, Rishi K, Manyalibo J. *Acta Materialia*[J], 2020, 194: 464
- [33] Shi Xiaojie, Liu Xin, Ren Shuai et al. *International Journal of Material Forming*[J], 2022, 15(1)
- [34] Peng Gangyong(彭刚勇). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D], Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018
- [35] Ma Yue(马悦). *Thesis for Master*(硕士论文)[D], Tianjin: Hebei

- University of Technology, 2015
- [36] Luo Xinlei(罗心磊), Liu Meihong(刘美红), Li Zhenhua(黎振华) *et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)[J]*, 2021, 48(14): 52
- [37] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. *Metallurgical Transactions B[J]*, 1984, 15(2): 299
- [38] Pan Aigang(潘艾刚), Wang Junbiao(王俊彪), Zhang Xianjie(张贤杰). *Computer Simulation(计算机仿真)[J]*, 2014, 31(2): 315
- [39] Lassner E, Schubert W D. *Tungsten Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds[M]*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999: 31
- [40] Luo C, Qiu J, Yan Y *et al. Journal of Materials Processing Technology[J]*, 2018, 261(1): 74
- [41] Chen Te(陈特). *Thesis for Master(硕士学位论文)[D]*, Zhenjiang: Jiangsu University, 2020
- [42] Jiang Jing(江静), An Ning(安宁), Yang Guangyu(杨广宇) *et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)[J]*, 2022, 49(8): 60
- [43] Li Hongtao(李红涛). *Thesis for Master(硕士学位论文)[D]*, Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017
- [44] Xiao Zhongxu(肖中旭). *Thesis for Doctorate(博士学位)[D]*, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021

Numerical Simulation on Stress Field of Selective Laser Melting Tungsten

Zhou Muhua, Zhao Congcong

(Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

Abstract: A thermodynamic coupling finite element model of tungsten selective laser melting was established by the “birth and death element” technique to simulate the powder laying process, taking into account the material parameter characteristics and latent heat of phase transition. The temperature and stress fields of the forming parts during selective laser melting were simulated. The effects of different preheating temperatures of substrate and different support structures on the residual stress of formed parts were investigated. The simulation results show that tungsten undergoes many heating and cooling processes during selective laser melting, and the temperature distribution is not uniform. Both substrate preheating and applying support structures can reduce the residual stress of the formed part. When the preheating temperature of the substrate is 1273.15 K, the residual stress of the intermediate joint of the forming part is reduced by 118.99 MPa (reduced by 9.96%). When the four-layer grid support structure is adopted, the residual stress of the middle joint of the forming part is reduced by 413.33 MPa (reduced by 34.61%).

Key words: selective laser melting; numerical simulation; residual stress; substrate preheating; support structure

Corresponding author: Zhao Congcong, Ph. D., Associate Professor, Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, P. R. China, E-mail: zhaocc@jihualab.ac.cn