

基于连续逐层添加的金属增材制造热-力耦合行为数值模拟研究

曹流, 朱民富, 李峻荣, 张沁丹

(广州大学机械与电气工程学院系统流变学研究所, 广东广州 510006)

摘要: 金属增材制造是引领第三次工业技术革命的核心技术之一。然而, 因过大的残余应力所引发的变形、开裂、抗腐蚀性能下降等问题仍然是阻碍金属增材制造发展的主要瓶颈之一。本文借助开源多物理场仿真平台Elmer, 开展了基于连续逐层添加的金属增材制造热-力耦合行为数值模拟研究。其中, 连续逐层添加是依据时间与单元位置等信息实时控制单元的激活状态得以实现, 应力释放的预测是通过人为将基板的弹性模量设置为很小的值得以实现。针对激光能量输入与基板预热温度对金属增材制造热-力耦合行为的影响, 发现随着激光能量输入逐渐降低或基板预热温度逐渐提高, 制件的位移逐渐减小, 制件的残余应力水平逐渐减弱; 相比于激光能量输入, 基板预热温度对金属增材制造热-力耦合行为的影响更大。

关键词: 热-力耦合行为; 金属增材制造; 残余应力; 变形; 应力释放; 数值模拟

作者简介:

曹流 (1991-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为金属增材制造过程数值模拟。
E-mail: caoliu@gzhu.edu.cn

中图分类号: TG391.99;
TG249.9

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977 (2024) 08-1065-08

基金项目:

广州市科技计划市校(院)联合资助项目 (SL2022A03J00959); 广州市科技计划基础与应用基础研究项目 (SL2022A04J01376)。

收稿日期:

2023-11-03 收到初稿,
2023-12-22 收到修订稿。

金属增材制造作为高端数字化智能制造技术, 是先进制造业中最具发展前景的制造技术, 也是引领第三次工业技术革命的核心技术之一^[1]。然而, 由于金属增材制造具有高能量密度、微小加工区域、非平衡态的快速熔化、凝固与冷却等特点, 导致因过大的残余应力所引发的变形、开裂、抗腐蚀性能下降等问题仍然是阻碍金属增材制造发展的主要瓶颈之一^[2-3]。

按作用尺度的不同, 金属增材制造残余应力可分为宏观残余应力 (>1 mm)、晶间残余应力 ($0.01\sim 1$ mm) 和晶内残余应力 (<0.01 mm)^[4], 其中, 宏观残余应力是引发宏观变形及开裂的主要原因。当前, 工业界与学术界为调控金属增材制造残余应力已开展了大量试验研究。其中, 主要借助破坏式 (盲孔法、轮廓法等) 与非破坏式 (中子衍射法、X射线衍射法、超声波法等) 检测方法^[5-6], 探究了激光功率、扫描长度、扫描策略、扫描速度、基板预热、基板预置压应力、热处理、固态相变等因素对金属增材制造残余应力的影响^[7-10], 并提出了控制能量输入、调整工艺参数、添加实时加热装置、依靠实时温度检测优化温度分布等残余应力调控措施^[11-12]。上述调控策略在减小某些合金的金属增材制造残余应力方面表现出较好的应用效果, 但由于缺乏有效地调控准则, 实施时主要采用试错法, 使得其离通用化工程应用还存在一定距离。

数值模拟作为高效低成本的定量化与可视化分析手段, 可与实验研究一起成为研究金属增材制造残余应力的有效方法。当前金属增材制造残余应力模拟研究主要分为三大类, 即解析模型预测^[13]、逐层预测^[14-20]以及逐层逐道预测^[21-24]。其中, 解析模型预测研究通过提取影响金属增材制造残余应力的主要因素, 给出描述制件整体残余应力水平的解析式^[13]。逐层预测研究将单个成形层视为基本对象, 计算时借助生死单元法每次将整层网格加入计算域, 即采用所谓的层级动态网格。逐层预测研究中的理论模型主要包括固有应变法^[14-15]、温度函数法^[16-17]以及热-力耦合计算^[18], 为提高热-力耦合计算的求解效率, 通常采用自适应网格^[19]、局部区域迭代^[20]、GPU加速^[20]等加速策略。逐层逐道预测研究将单个成形道视为基本对象, 其网格处理方法

分为两种，一是借助生死单元法将单个成形道网格分割成一份或若干份，再逐步添加至计算域，即采用所谓的道级动态网格^[21-22]；二是依据金属增材制造前处理所获得的扫描路径数据，逐步将成形域及其附近的网格添加至计算域，即采用所谓的路径级动态网格^[23-24]。

上述金属增材制造残余应力模拟研究中，解析模型预测只能给出制件整体残余应力，且模型假设较多，往往只能用于定性对比不同工艺情形下的残余应力状态。逐层逐道预测采用道级或路径级动态网格，使得其能够很好地描述成形层内与层间的热-力耦合行为。但是，当前逐层逐道预测研究的最大阻碍为计算效率过低，当前逐层逐道预测主要应用于简单几何场景。逐层预测采用层级动态网格，使得其计算效率在很大程度上得以保证，进而易于获得制件整体的残余应力分布，这也是逐层预测成为当前主流模拟方法的主要原因。然而，当前逐层预测研究往往需要人为将制件划分为多个成形层，进而控制各个成形层参与计算的时间，设置过程繁琐，而且人为设定的成形层厚度对计算结果有较大影响。

因此，为简化逐层预测金属增材制造残余应力的前处理流程，以及避免人为设定成形层厚度对计算结果造成影响，本文借助开源多物理场仿真平台Elmer^[25]开展基于连续逐层添加策略的金属增材制造热-力耦合行为数值模拟研究；然后，分析激光能量输入与基板预热温度对金属增材制造残余应力及变形的影响，并与试验结果进行对比。本文有助于快速预测金属增材制造热-力耦合行为，进而为调控金属增材制造残余应力及变形提供科学指导。

1 数值模型

所谓的连续逐层添加策略，指的是不需要对制件网格进行人为分层，而只需借助各个单元的位置信息，实时判断其是否被纳入已沉积区。若某个单元被纳入已沉积区，则该单元将参与热-力耦合计算，否则不参与计算。为保证金属增材制造热-力耦合计算效率，本文做出了如下简化与假设：①未施加激光热源，而直接将制件初始温度设置为较高温度，以达到制件被加热的效果；②将制件视为各向同性材料，其力学本构模型为线弹性。

1.1 金属增材制造传热模型

由于未施加激光热源，这里的金属增材制造传热模型即为基本的热传导控制方程^[15]：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

式中： ρ 为密度， kg/m^3 ； c_p 为比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； T 为

温度， K ； t 为时间， s ； k 为热导率， $\text{W}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

换热边界考虑了对流换热与辐射换热。其中，对流换热的边界条件为式(2)，辐射换热的边界条件为式(3)。为简化辐射换热的计算，通常将式(3)线性化处理为式(4)。

$$-k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = h(T - T_{\text{ext}}) \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = \sigma \eta (T^4 - T_{\text{ext}}^4) \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) \approx \sigma \eta (T_{\text{bef}}^3 + T_{\text{ext}} T_{\text{bef}}^2 + T_{\text{ext}}^2 T_{\text{bef}} + T_{\text{ext}}^3) (T - T_{\text{ext}}) \quad (4)$$

式中： \vec{n} 为表面的外法向单位向量； n_x ， n_y ， n_z 为 \vec{n} 在三个坐标轴方向上的分量； h 为对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； T_{ext} 为环境温度， K ； σ 为Stefan-Boltzmann常数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； η 为表面发射率； T_{bef} 为上一时刻的温度， K 。

1.2 金属增材制造力学模型

本文所采用的热应力控制方程^[18]如下：

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{d}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \tau = \vec{f} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [\nabla \vec{d} + (\nabla \vec{d})^T] \quad (6)$$

$$\tau = 2\mu \varepsilon + \lambda \nabla \cdot \vec{d} I - \beta (T - T_0) I \quad (7)$$

其中：

$$\mu = \frac{E}{2(1+\kappa)} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{E\kappa}{(1+\kappa)(1-2\kappa)} \quad (9)$$

式中： \vec{d} 为位移向量， m ； τ 为应力张量， Pa ； \vec{f} 为体积力， N/m^3 ； ε 为应变张量； μ ， λ 分别为第一、第二梅系数， Pa ； I 为单位张量； β 为热膨胀系数， $1/\text{K}$ ； T_0 为参考温度， K ； E 为杨氏模量， Pa ； κ 为泊松比。

1.3 金属增材制造热-力耦合策略与仿真流程

本文借助开源多物理场仿真平台Elmer^[25]开展金属增材制造热-力耦合行为预测。为实现温度场和应力场的耦合计算，需同时激活Elmer所提供的Heat Equation和Linear elasticity模块，并将Heat Equation模块的优先级设为2，将Linear elasticity模块的优先级设为1。为实现连续逐层添加计算单元，需借助Body force功能，为温度场Temperature计算与位移场Displacement计算添加如下的控制策略：

```
Temperature Passive=Variable "time, Coordinate"
Real MATC "if ( tx ( 3 ) > ( 0.005+tx ( 0 )
*0.0003 ) ) 1.0; else-1.0"
```

Displacement Passive=Variable “time, Coordinate”
 Real MATC “if (tx (3) > (0.005+tx (0) *0.0003)) 1.0; else-1.0”
 上述控制代码所实现的功能是：基板高度为5 mm，成形区域以0.3 mm/s的速率沿Z向堆积，未处于堆积区

的单元不被激活，只有处于堆积区的单元才能参与计算。图1为基于连续逐层添加策略的金属增材制造热-力耦合仿真流程。需要说明的是，需分别为基板和制件划分网格，以达到分别设置物性参数与指定单元激活策略的目的。

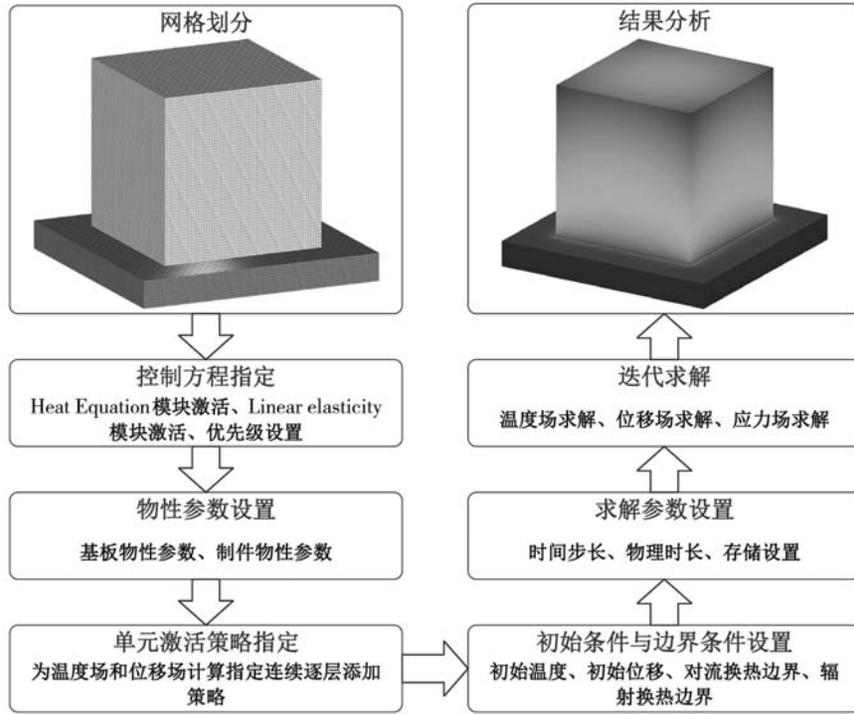


图1 基于连续逐层添加策略的金属增材制造热-力耦合仿真流程

Fig. 1 Simulation flow of MAM thermal-mechanical coupling based on the continuous layer-by-layer addition strategy

2 结果与讨论

2.1 计算参数

本文所采用的制件材料和基板材料均为316L不锈钢，其合金成分（质量分数）为：Fe 65.395%-Cr 17.0%-Ni 12.0%-Mo 2.5%-Mn 2.0%-Si 1.0%-P 0.045%-S 0.03%-C 0.03%。图2为借助软件JMatPro v7.0所获得的316L不锈钢物性参数。其他的参数包括：泊松比为0.27；固相线温度为1 660 K；对流换热系数为26 W/(m²·K)；表面热辐射系数为0.63。

图3为本文所采用的几何与网格模型，其中，网格尺寸为0.5 mm。该几何模型与文献[26]所采用的实验模型是一致的，以便于将模拟结果与试验结果进行对比验证。另外，制件的参考温度为制件初始温度，基板的参考温度为环境温度，环境温度与基板预热温度是一致的，成形区域的堆积速率为0.3 mm/s，并为基板底面施加固定位移边界，所采用的仿真平台为Windows版本的ElmerGUI 9.0^[25]，所采用的计算资源配置为Intel Xeon Gold 5218R CPU（40线程，32 GB内存）。

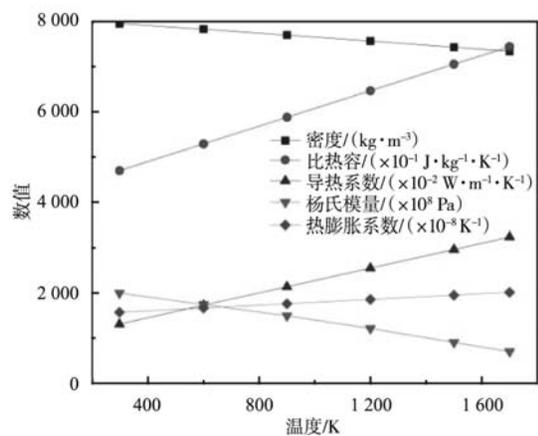


图2 316L不锈钢的物性参数

Fig. 2 Physical properties of the 316L stainless steel

2.2 激光能量输入对热-力耦合行为的影响

由于连续逐层添加策略是以整层网格作为研究对象，故无法施加激光热源。为分析激光能量输入对热-力耦合行为的影响，可行的做法是将激光能量输入与

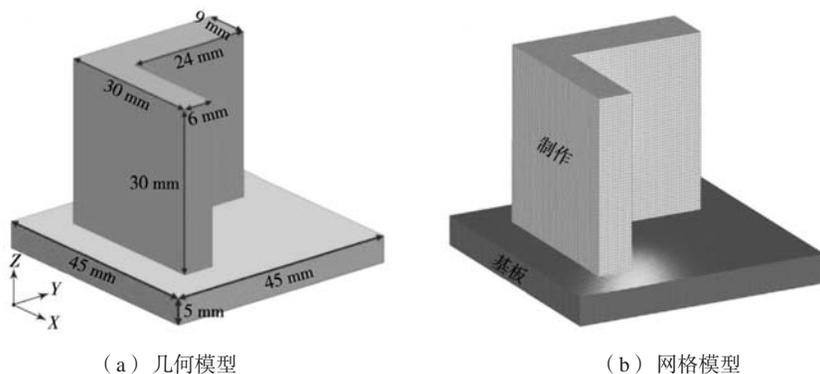


图3 所采用的几何与网格模型

Fig. 3 The geometric and mesh models adopted

制件初始温度进行等效。表1为不同制件初始温度下的计算方案。另外，这些计算方案中的环境温度均为298 K。

表1 不同制件初始温度下的计算方案
Table 1 Calculation schemes for different component initial temperatures

计算方案	A1	A2	A3
制件初始温度/K	1 760	1 660	1 560

图4和图5给出了方案A2情形下不同时刻下的温度场和位移场分布。由计算结果可知，本文所采用的连续逐层添加策略可以很好地实现逐层堆积成形材料。由于基板底面被施加了固定位移边界，随着堆积材料逐渐降温，最大的位移发生在制件顶面。图6a1和6b1分别给出了制件降温至环境温度后的位移和等效应力分布。由于此时可以认为，制件与基板是固接在一起的，而且基板基本不发生位移，故制件底面也基本不发生位移（图6a1），从而使得制件底端出现很大的等效应力（图6b1）。实际生产中往往会采用线切割等方式将制件与基板进行分割，分割后的制件将发生所谓的应力释放。为实现针对应力释放现象的预测，本文在图6a1和6b1所示的位移和等效应力分布基础上，人为地将基板的弹性模量设置为很小的值，以达到制件底端可以自由变形的目的。图6a2和6b2分别给出了制件应力释放后的位移和等效应力分布，可以看出，制件底面发生了明显的位移（图6a2），制件的残余应力出现了极大的释放，并进行了应力重新分布（图6b2）。

图7给出了仿真和实验情形下制件Z向中截面的残余应力 σ_{zz} 对比结果^[26]。由对比结果可知，残余应力 σ_{zz} 的分布规律是一致的，但残余应力数值相差较大。其主要原因在于，本文只考虑了弹性力，应力释放时残余应力得到了极大的释放，而在实际成形过程中，当

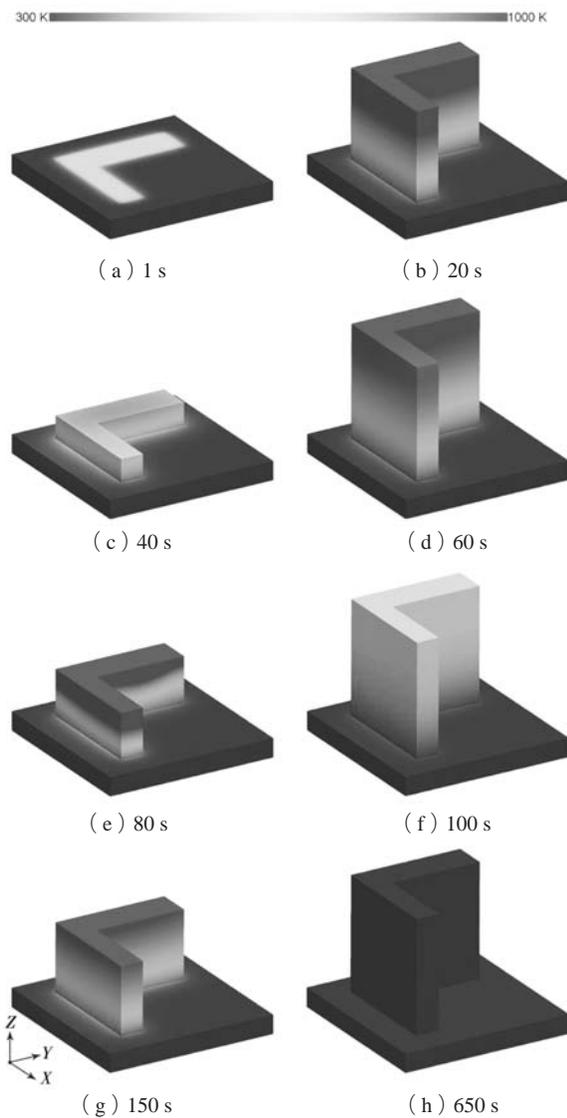


图4 成形过程温度场

Fig. 4 Temperature fields of the forming process

应力水平达到屈服强度后将发生塑性变形。由于制件与基板相接触的部位在成形过程中处于较高的应力水平，该部位将极易发生塑性变形，使得在分割制件与

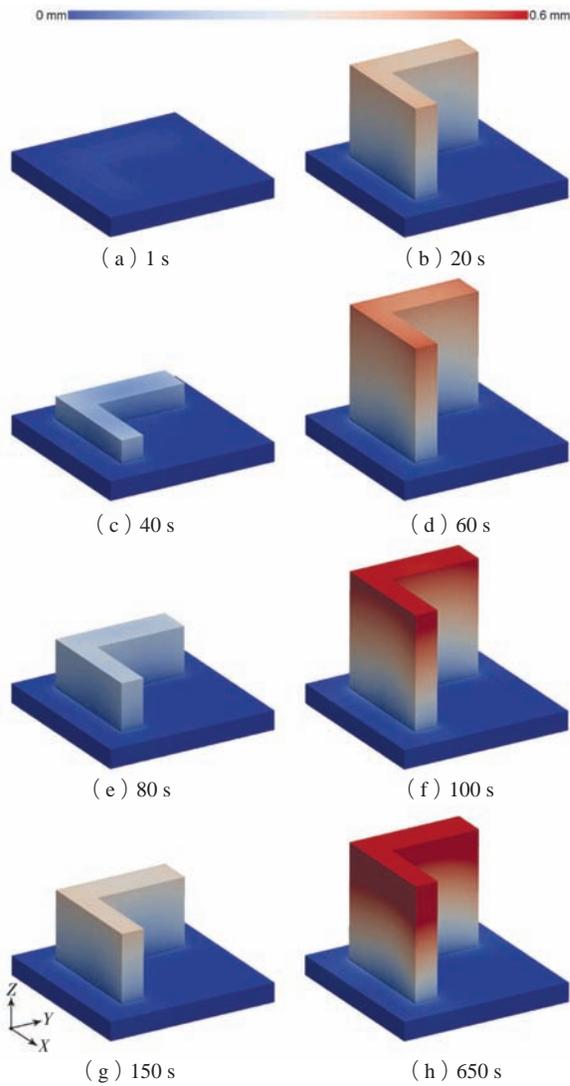
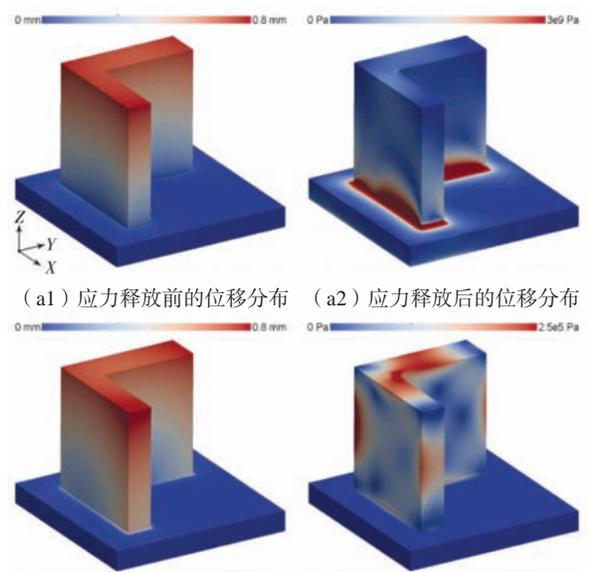


图5 成形过程位移场

Fig. 5 Displacement fields of the forming process



(b1) 应力释放前的等效应力分布 (b2) 应力释放后的等效应力分布

图6 应力释放前后的位移和等效应力分布对比

Fig. 6 Comparison of the displacement and equivalent stress distributions before and after stress release

基板的过程中制件的应力释放效果比只考虑弹性力的情形弱很多。由于本文的主要目的是建立基于连续逐层添加策略的金属增材制造热-力耦合仿真流程，后续研究将会植入弹塑性本构模型，因此，本文的仿真结果主要用于定性对比不同工艺参数对金属增材制造热-力耦合行为的影响。

图8给出了方案A1-A3情形下制件最终的位移、等效应力以及Z向中截面残余应力 σ_{zz} 分布。图9给出了方案A1-A3情形下特定线段（线段的具体位置见图8）的残余应力 σ_{zz} 分布。由对比结果可知，随着制件初始温

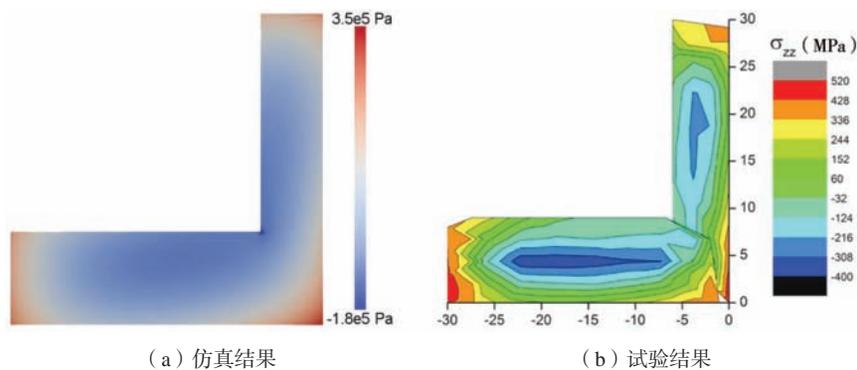


图7 制件Z向中截面的残余应力 σ_{zz} 对比

Fig. 7 Comparison of the residual stress σ_{zz} in the Z-direction mid-section of the component

度逐渐降低，制件的位移逐渐减小，制件的残余应力水平有所减弱，但具体的数值相差不大。考虑到方案A1与方案A3的制件初始温度相差了200 K，而残余应力

的数值相差不大，可见，只有在激光能量输入变化较大的情形（如显著地调整激光功率、扫描速度、扫描间距等工艺参数）下，制件的热-力耦合行为才能受到

明显的影响。

2.3 基板预热温度对热-力耦合行为的影响

为分析基板预热温度对金属增材制造热-力耦合行为的影响，表2给出了不同基板预热温度下的计算方案。另外，这些计算方案中的制件初始温度均为1 660 K。

表2 不同基板预热温度下的计算方案
Table 2 Calculation schemes for different substrate preheating temperatures

计算方案	B1	B2	B3
制件初始温度/K	298	398	498

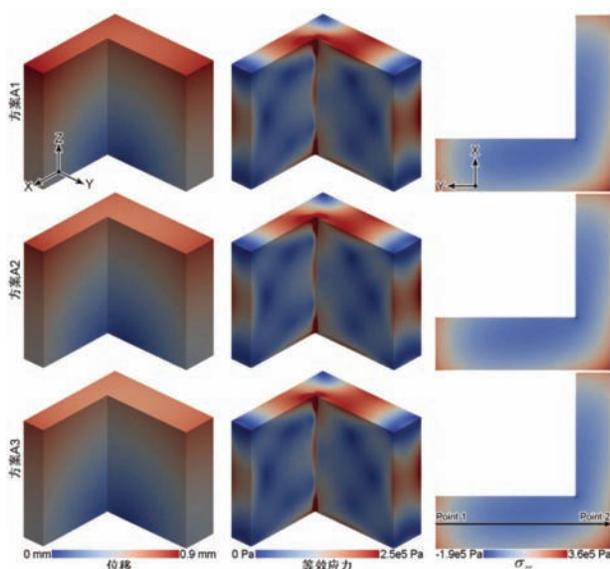


图8 方案A1-A3情形下制件最终的位移、等效应力以及Z向中截面残余应力 σ_{zz} 分布

Fig. 8 Final displacement, equivalent stress, and residual stress σ_{zz} in the Z-direction mid-section of the component for the schemes A1-A3

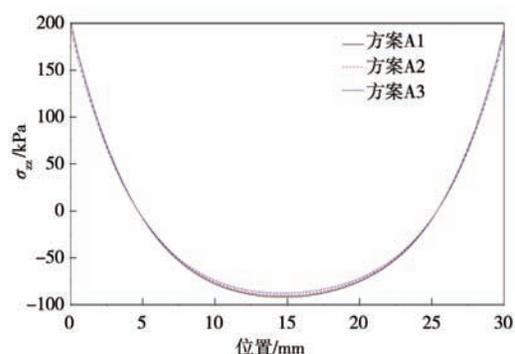


图9 方案A1-A3情形下特定线段的残余应力 σ_{zz} 分布

Fig. 9 Residual stress σ_{zz} distributions in a specific line segment for the schemes A1-A3

图10给出了方案B1-B3情形下制件最终的位移、等效应力以及Z向中截面残余应力 σ_{zz} 分布。图11给出了方案B1-B3情形下特定线段（线段的具体位置见图10）的残余应力 σ_{zz} 分布。由对比结果可知，随着基板预热温度逐渐提高，制件的位移逐渐减小，制件的残余应力水平显著减弱。方案B1与方案B3的基板预热温度相差了200 K，造成残余应力的数值出现较大差异的主要原因是制件材料具有随温变化的物性参数（图2），而基板预热温度下的物性参数（如弹性模量、密度、热膨胀系数等）对制件最终的残余应力水平影响较大。可见，相比于激光能量输入，基板预热温度对金属增材制造热-力耦合行为的影响更大。

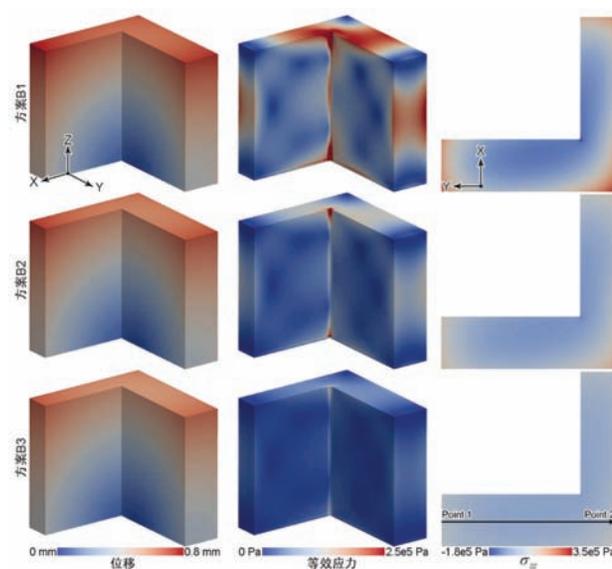


图10 方案B1-B3情形下制件最终的位移、等效应力以及Z向中截面残余应力 σ_{zz} 分布

Fig. 10 Final displacement, equivalent stress, and residual stress σ_{zz} in the Z-direction mid-section of the component for the schemes B1-B3

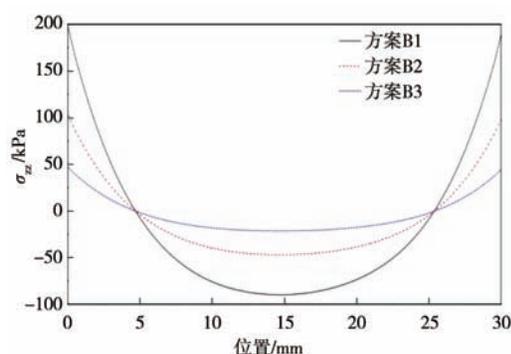


图11 方案B1-B3情形下特定线段的残余应力 σ_{zz} 分布

Fig. 11 Residual stress σ_{zz} distributions in a specific line segment for the schemes B1-B3

3 结语

(1) 本文借助开源多物理场仿真平台Elmer, 开展了基于连续逐层添加策略的金属增材制造热-力耦合行为数值模拟研究。其中, 连续逐层添加策略的实现方法是: 在求解温度场Temperature与位移场Displacement之前, 借助Elmer的Body force功能, 根据时间与单元位置等信息实时控制单元的激活状态, 只有处于堆积区的单元才能参与计算。

(2) 针对激光能量输入与基板预热温度对金属增材制造热-力耦合行为的影响, 研究发现: 随着激光能量输入逐渐降低或基板预热温度逐渐提高, 制件的位移逐渐减小, 制件的残余应力水平逐渐减弱; 只有在

激光能量输入变化较大的情形(如显著地调整激光功率、扫描速度、扫描间距等工艺参数)下, 制件的残余应力水平才能受到明显的影响; 相比于激光能量输入, 基板预热温度对金属增材制造热-力耦合行为的影响更大。

(3) 本文的主要目的是建立基于连续逐层添加策略的金属增材制造热-力耦合仿真流程, 当前研究采取了一定的简化与假设(如将制件视为线弹性材料、未建立激光能量输入与制件初始温度的定量化关系), 后续研究将做进一步完善(如将制件视为弹塑性材料、确立激光能量输入与制件初始温度的定量化关系)。

参考文献:

- [1] 刘金城. 金属增材制造——创新的3D制造 [J]. 铸造, 2020, 69(4): 437-438.
- [2] 谭志俊, 高双, 何博. 激光增材制造金属零部件变形的研究现状 [J]. 机械工程材料, 2020, 44(9): 11-16.
- [3] FANG Z C, WU Z L, HUANG C G, et al. Review on residual stress in selective laser melting additive manufacturing of alloy parts [J]. Optics and Laser Technology, 2020, 129: 106283.
- [4] CHEN S G, GAO H J, ZHANG Y D, et al. Review on residual stresses in metal additive manufacturing: formation mechanisms, parameter dependencies, prediction and control approaches [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 17: 2950-2974.
- [5] CARPENTER K, TABELI A. On residual stress development, prevention, and compensation in metal additive manufacturing [J]. Materials, 2020, 13: 255.
- [6] ACEVEDO R, SEDLAK P, KOLMAN R, et al. Residual stress analysis of additive manufacturing of metallic parts using ultrasonic waves: state of the art review [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 9457-9477.
- [7] CHEN W, XU L Y, HAN Y D, et al. Control of residual stress in metal additive manufacturing by low-temperature solid-state phase transformation: an experimental and numerical study [J]. Additive Manufacturing, 2021, 42: 102016.
- [8] 程勇. 激光选区熔化成形GH4169残余应力和变形研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [9] WANG X Q, CHOU K. The effects of stress relieving heat treatment on the microstructure and residual stress of Inconel 718 fabricated by laser metal powder bed fusion additive manufacturing process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 48: 154-163.
- [10] WANG D, WU S B, YANG Y Q, et al. The effect of a scanning strategy on the residual stress of 316L steel parts fabricated by selective laser melting (SLM) [J]. Materials, 2018, 11: 1821.
- [11] RAMANI K S, HE C, TSAI Y-L, et al. Smart scan: an intelligent scanning approach for uniform thermal distribution, reduced residual stresses and deformations in PBF additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2022, 52: 102643.
- [12] HONG M P, KIM Y S. Residual stress reduction technology in heterogeneous metal additive manufacturing [J]. Materials, 2020, 13: 5516.
- [13] MIRKOOHI E, LI D S, GARMESTANI H, et al. Residual stress modeling considering microstructure evolution in metal additive manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 383-397.
- [14] 尹清远, 韦辉亮, 张昌春, 等. 基于固有应变法的激光增材制造特征结构应力与变形高效预测 [J]. 中国激光, 2022, 49(14): 140220.
- [15] PROMOPPATOM P, UTHAISANGSUK V. Part scale estimation of residual stress development in laser powder bed fusion additive manufacturing of Inconel 718 [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2021, 189: 103528.
- [16] 贾金龙, 赵玥, 董明晔, 等. 基于温度函数法的铝合金电弧增材制造残余应力与变形数值模拟 [J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 1-6.
- [17] 谢瑞山, 陈高强, 史清宇. 金属增材制造零件变形研究现状 [J]. 精密成形工程, 2019, 11(4): 15-20.
- [18] MALMELÖV A, HASSILA C J, FISK M, et al. Numerical modeling and synchrotron diffraction measurements of residual stresses in laser powder bed fusion manufactured alloy 625 [J]. Materials & Design, 2022, 216: 110548.
- [19] BAIGES J, CHIUMENTI M, MOREIRA C A, et al. An adaptive finite element strategy for the numerical simulation of additive manufacturing processes [J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101650.

- [20] HUANG H, MAN S, CHEN J, et al. Toward large-scale simulation of residual stress and distortion in wire and arc additive manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101248.
- [21] ZHAO H J, LIU Z H, YU C Y, et al. Finite element analysis for residual stress of TC4/Inconel718 functionally gradient materials produced by laser additive manufacturing [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 152: 108146.
- [22] 张宇祺. 激光增材制造金属零件过程中的热力学分析及热变形研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [23] ZHOU J B, BARRETT R A, LEEN S B. Three-dimensional finite element modelling for additive manufacturing of Ti-6Al-4V components: Effect of scanning strategies on temperature history and residual stress [J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2022, 5: 100106.
- [24] NYCZ A, LEE Y, NOAKES M, et al. Effective residual stress prediction validated with neutron diffraction method for metal large-scale additive manufacturing [J]. *Materials & Design*, 2021, 205: 109751.
- [25] KONDOV I, SUTMANN G. Multiscale modelling methods for applications in material science[M]. Forschungszentrum Juelich, 2013, 101-113.
- [26] AMANDA S W, DONALD W B, MUKUL K, et al. An Experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, 45 (13) : 6260-6270.

Numerical Simulation of Thermal-Mechanical Coupling Behavior of Metal Additive Manufacturing Based on Continuous Layer-By-Layer Addition

CAO Liu, ZHU Min-fu, LI Jun-rong, ZHANG Qin-dan

(Institute for Systems Rheology, School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract:

Metal additive manufacturing (MAM) is one of the core technologies leading the third industrial technology revolution. However, the problems of deformation, cracking, and degradation of corrosion resistance caused by excessive residual stress are still one of the major bottlenecks hindering the MAM development. In this paper, a numerical simulation study on the MAM thermal-mechanical coupling behavior based on the continuous layer-by-layer addition was carried out with the help of the open-source multiphysics simulation platform Elmer. Among them, the continuous layer-by-layer addition was realized by controlling the activation state of the elements in real time based on the information of time and elements' positions, and the prediction of stress release was realized by artificially setting the Young's modulus of the substrate to a very small value. With regard to the effects of laser energy input and substrate preheating temperature on the MAM thermal-mechanical coupling behavior, it was found that with the gradual decrease of laser energy input or the gradual increase of substrate preheating temperature, the displacement of the component decreased gradually, and the residual stress level of the component was gradually weakened; compared with the laser energy input, the substrate preheating temperature had a greater effect on the MAM thermal-mechanical coupling behavior.

Key words:

thermal-mechanical coupling behavior; metal additive manufacturing; residual stress; displacement; stress release; numerical simulation