DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.04.009

选区激光熔化成形高温合金 GH4169 薄壁件有限元分析*

陈劲松,霍振浩,闫琦昊,龚诚信,黄　达

(江苏海洋大学 机械工程学院,江苏 连云港　222005)

摘　要:基于选区激光熔化成形高温合金 GH4169 材料薄壁件的有限元仿真,通过对选区激光熔化成形过程中的温度场与应力场进行分析,研究了激光扫描速度、铺粉厚度对薄壁件成形效果的影响。将选区激光熔化成形薄壁件过程中的温度场与应力场结合,建立了瞬态热-静态结构耦合场,对成形薄壁件过程进行分析。结果表明,通过增大扫描速度减小能量密度,薄壁件尺寸偏差随着应力降低而变小;通过增大铺粉厚度导致温度梯度增大,薄壁件尺寸偏差随着冷却后的残余应力增大而增大,当扫描速度为 1 200 mm/s、铺粉厚度为 0.03 mm 时打印效果最好。并通过实验验证了实际变形数据与有限元模拟方法趋势一致,有限元方法可以对实验过程进行较好模拟。

关键词:高温合金 GH4169;选区激光熔化成形;仿真模拟;温度场;应力场

中图分类号:TG142　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2096-8248(2024)04-0067-08

引用格式:陈劲松,霍振浩,闫琦昊,等. 选区激光熔化成形高温合金 GH4169 薄壁件有限元分析[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版),2024,33(4):67-74.

Finite Element Analysis of Selective Laser Melting of GH4169 Thin-walled Parts

CHEN Jinsong, HUO Zhenhao, YAN Qihao, GONG Chengxin, HUANG Da

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: This study employs finite element simulation to investigate the effects of laser scanning speed and powder layer thickness on the formation quality of thin-walled parts made from GH4169 material using selective laser melting (SLM). By analyzing the temperature and stress fields during the SLM process, a transient thermal-structural coupled field model was developed to assess the formation of thin-walled parts. The findings reveal that increasing the scanning speed, which reduces energy density, leads to a reduction in part dimensions and stress levels. Conversely, augmenting the powder layer thickness enhances the temperature gradient, resulting in greater size deviations and increased residual stresses upon cooling. Optimal printing outcomes were achieved at a scanning speed of 1 200 mm/s with a powder layer thickness of 0.03 mm. Experimental validation confirms that the actual deformation data aligns with the trends predicted by the finite element simulation, indicating that this method provides an effective simulation of the experimental process.

Key words: GH416; selective laser melting (SLM) forming; simulation; temperature field; stress field

* **收稿日期**:2024-03-06;**修订日期**:2024-11-04

基金项目:江苏海洋大学研究生科研与实践创新计划项目(11641)

作者简介:陈劲松(1977—),男,安徽肥东人,教授,博士,研究方向为特种加工技术,(E-mail)jinsong20001@163.com。

通信作者:霍振浩(1996—),男,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,研究方向为增材制造,(E-mail)1422533612@qq.com。

0 引言

高温合金 GH4169(Inconel 718)的抗高温性、抗疲劳性以及抗高温蠕变性良好,用该材料制造的结构件常用于高温工作环境中,并在航空航天、石油等行业中应用广泛[1]。选区激光熔化成形技术(selective laser melting, SLM)是通过激光烧结粉末形成每层实体形状,最终通过层层堆叠的方式获得设计的金属零件[2-3]。选区激光熔化成形技术可以制造具有复杂结构的金属零件,并且金属零件力学性能优良[4]。但是由于冷却时每层横截面温度不同,零件内部会产生热应力[5]。同时,由于受到基板的约束力,最终会导致零件变形。而利用有限元软件对加工过程中的温度场与应力场进行研究可以提高工作效率。

由于 SLM 成形薄壁件打印效果不佳,国内外学者做了许多研究。杜世浩等[6]通过有限元模拟研究了高强铝合金 A17075 的多层多道成形温度场,分析了激光功率和扫描速度对温度场的影响,确定了合理的工艺参数范围。许明三等[7]研究了 SLM 成形薄壁件与扫描速度与激光功率的关系,通过有限元仿真分析和试验验证,确定了最优工艺参数区间。姚少科等[8]通过建立热力耦合有限元模型,模拟了激光成形 316L 不锈钢薄壁件的温度场和应力场,研究了高度对残余应力分布的影响。Hintze 等[9]研究了钛合金薄壁零件的精密加工,并设计夹具来高效去除支撑结构。Zhang 等[10]研究了选择性激光熔化技术制造的 AlSi10Mg 合金薄壁件的应力分布情况,通过优化工艺参数,使其力学性能得到提高,并分析了不同薄壁件的断裂行为。Lu 等[11]通过打印 AlSi10Mg 合金的超薄壁结构,详细分析了工艺参数如能量密度、扫描速度和激光功率对超薄壁几何形态、层间结合特性及缺陷的影响。上述研究主要集中于薄壁零件制备等方面,为后续薄壁件制造与研究提供了理论基础。但上述研究沉积层数均为 10 层以下,对于高沉积层数下的打印参数与温度场及应力场的分析还有待补充与完善。

本文针对高沉积层数的高温合金 GH4169 薄壁件,模拟了 1 666 层薄壁件成形过程,通过分析温度场与应力场,探究不同参数对打印效果的影响,最后利用实验对仿真结果进行了验证。

1 SLM 成形有限元模型建立

1.1 模型与网格划分

对薄壁零件使用 ANSYS 软件进行仿真。SLM 成形原理是单点激光对金属粉末加热,以点-线-面的形式进行成形。根据原理,利用 ANSYS 中温度场与应力场相结合的方法可以有效地模拟单元的热传导过程以及应力形成过程,并且利用该方法还可以有效模拟打印过程中材料熔化、凝固和热应力分布过程。

实验使用的薄壁零件为 50 mm×50 mm×0.8 mm 的正方形薄板,打印所用的基板尺寸为 120 mm×120 mm×20 mm。为了提升计算效率,对成形部分与基板部分使用不同的网格大小进行划分,成形部分采用像素体密集网格,大小为 1 mm×1 mm×0.8 mm,材料使用高温合金 GH4169,成形层划分为 50 层的单元格;基板使用稀疏网格划分,大小为 5 mm×5 mm×5 mm,粉末通过单通道堆积,最终形成薄壁件,单元网格划分结果如图 1 所示。

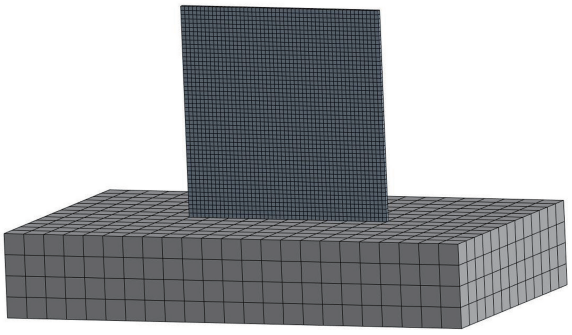


图 1 有限元网格划分

Fig. 1 Finite element mesh division

本文主要研究激光扫描速度与铺粉厚度对打印效果的影响,所以设置激光扫描间隔为 0.08 mm,激光功率设置为 150 W。SLM 机器成形参数设置如表 1 所示。

表 1 打印机参数设置

Table 1 Printer parameter settings

设置参数	参数值
铺粉厚度/mm	0.03～0.05
激光扫描间隔/mm	0.08
激光扫描速度/(mm·s^{-1})	800～1 200
激光功率/W	150

1.2　有限元模拟温度场

在 ANSYS 模拟温度场的过程中,由于激光作用在金属粉尘上,产生了热传导、热辐射等复杂变化,是一个典型的非线性瞬态热传导过程。热传导过程满足热传递方程,可用式(1)[12]表示,即

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

式中:ω 为导热增强系数;k 为导热率;T 为热床温度;Q 为内热源;t 为加工时间;c 为材料比热容;ρ 为材料密度。在打印过程中,通过激光产生的能量使粉末熔化。此过程中,材料内部的热能大部分为热辐射和热对流,热能传导方程式可用式(2)[13]表示,即

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}=\lambda(T_1-T_0)+\sigma\varepsilon(T_1^2-T_0^2)(T_1-T_0)。\tag{2}$$

式中:λ 为物体热膨胀系数;σ 为 Stefan-Boltzmann 常数;T_1 为加工时零件温度;T_0 为环境温度,设定环境温度为 20 ℃。

在仿真成形过程中,考虑到激光的光源在实际加工过程中可以穿透金属粉末,所以可以通过选择高斯热源模型来进行激光光源模拟。将光学穿透深度(η)设定为铺粉厚度,能量在高度方向上指数式衰减,高斯分布移动体热源的数学表达式用式(3)[14]表示,即

$$q(x,y,z,t)=\frac{2AP}{\eta\pi r_0^2}\exp\left(\frac{-2(x-vt)^2+y^2}{r_0^2}\right)\exp\left(-\frac{|z|}{\eta}\right)。\tag{3}$$

式中:P 为激光功率,设定为 150 W;A 为高温合金 GH4169 对该激光的吸收率,取值为 0.38[15];r_0 为激光光斑半径;v 为扫描速度。

1.3　有限元模拟应力场

在仿真计算应力时采用间接耦合方式,将温度场作为前提条件得到应力场,其工作流程如图 2 所示。

在应力场仿真中,粉末在激光照射下熔化存在弹性和塑性变形,材料符合热-弹-塑性的原理。在塑性变形过程中,应力应变关系用式(4)[16]表示,即

$$\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{D}\boldsymbol{\varepsilon}_e。\tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{\sigma}$ 是应力向量;$\boldsymbol{D}$ 是弹性矩阵;$\boldsymbol{\varepsilon}_e$ 为弹性应变向量。

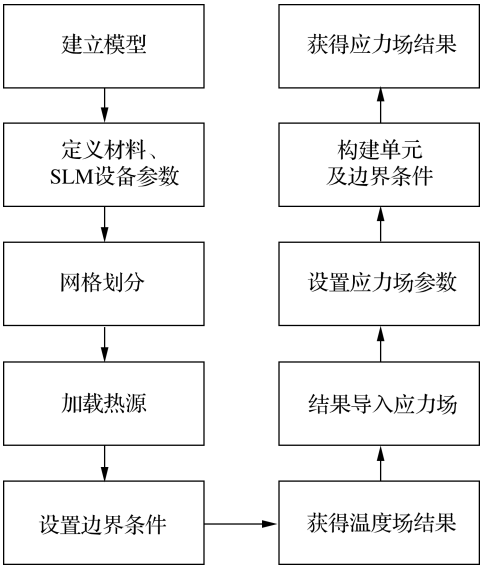


图 2　应力场建立流程

Fig. 2　Establishment process of stress field

模型采用 Mises 屈服准则表示屈服应力(σ_y),表达式用式(5)[17]表示,即

$$\frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}=\sigma_y。\tag{5}$$

式中:σ_1,σ_2 和 σ_3 分别为 3 个方向的主应力;σ_y 为屈服应力。

温差过大弹性变形会导致材料受热膨胀;热应力值大于材料屈服极限产生塑性变形,当等效应力超过屈服点时,材料进入塑性状态。

成形过程的总应变用式(6)表示,即

$$\varepsilon=\varepsilon_e+\varepsilon_p。\tag{6}$$

式中:ε 为总应变;ε_e 为弹性应变;ε_p 为塑性应变。

通过定义力学边界条件可以使计算收敛,在实际打印过程中,基板的变形与翘曲可以忽略不计,所以对基板的 x,y 和 z 方向施加位移约束,防止模型发生平移或转动。

1.4　材料热物性参数

在实际 SLM 加工过程中,金属粉末经历了粉—液—固 3 种状态的转变。不同温度状态下材料性能不同,为了提升仿真准确性采用随温度变化的热物性参数。本文金属粉末选取 GH4169,基板材料为 316L,熔点范围为 1 260～1 320 ℃[18],取 1 260℃为熔点,其热物性参数包括热导率 k、比热容 c,如图 3 所示。高温力学参数包括弹性模量 E、热膨胀系数 λ,如图 4[19]所示。

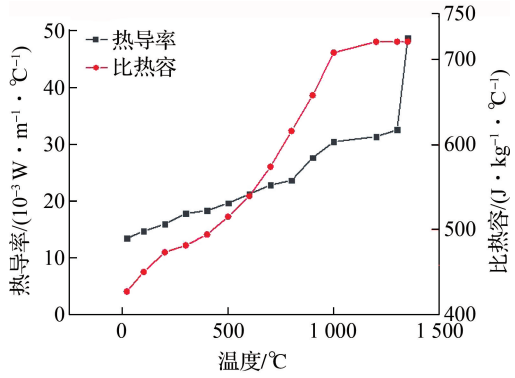


图 3 GH4169 热物性参数

Fig. 3 GH4169 thermophysical parameters

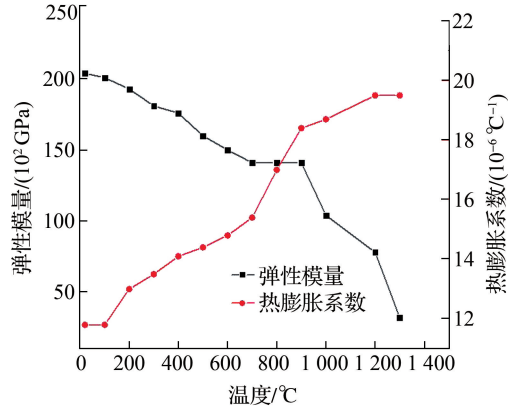


图 4 GH4169 高温力学参数

Fig. 4 GH4169 high temperature mechanical parameters

2 仿真结果与分析

2.1 温度场分析

通过粉末的温度变化及其热影响区域的变化对温度场进行分析。图 5 为扫描速度为 800 mm/s、铺粉厚度为 0.03 mm 时的温度曲线。图 6 为扫描速度为 1 200 mm/s、铺粉厚度为 0.03 mm 时的温度曲线。因为不同参数的温度变化规律相似,可以通过图 5 与图 6 进行研究。温度升高再回落为一个打印周期,当温度到达 1 260 ℃时,表明正处于粉末烧结过程,粉末处于熔融状态。观察到曲线呈现出波浪形,温度最高点时达到粉末熔点,粉末融化后随着激光束扫描结束温度迅速下降,并进行下一个打印周期。观察不同时刻最大温度折线的最小值可以发现,温度随着打印时间延长逐渐上升,这表明激光在后续打印时,多余的能量导致散热不均,热量积累导致最大温度折线的温度最小值逐渐变大。随着层高的增加,传热路径变长,后续层的温度最小值逐渐降低并趋于稳定。在加工过程中,升温速度明显快于降温速度,符合 SLM 技术的快速熔化和冷却特性。在图 5 中,由于激光扫描率较低,在 2 892.4 s 时打印完成进入冷却阶段;在图 6 中,由于扫描速度高而较快完成打印,在 1 939.5 s 时完成打印。通过对比两个图可以看出,随着扫描速度变快,打印时间加快,温度梯度明显减小。

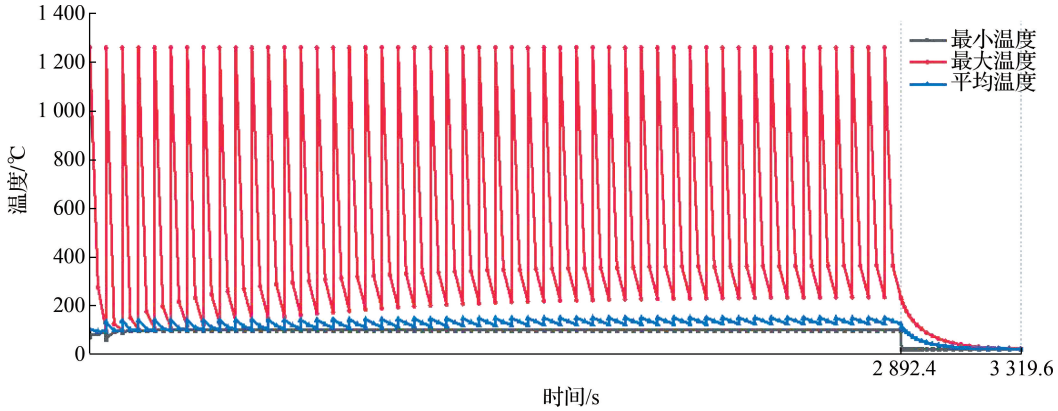


图 5 扫描速度 800 mm/s、铺粉厚度 0.03 mm 时温度变化

Fig. 5 Temperature changes with scanning speed of 800 mm/s and powder coating thickness of 0.03 mm

图 7 为打印过程中不同时刻的温度场。不同颜色代表不同温度范围,深红色代表 1 260 ℃高温区域,即高温合金 GH4169 的熔点。可以看出,每层的单元温度呈现均匀的条状。热影响区范围随层数增加而扩大,由于散热速率及熔池前部未完全熔化的粉末,加工层附近等温线密集,熔化后凝固的固体状态导致等温线稀疏。随着层数的增加,层间热积累效应使得熔池和热影响区逐渐变大。下层由于与基板相接,基板将下层多余的热量带走。并且在加工过程中,上层的余热对下层起到预热作用,提升致密性以及零件性能。

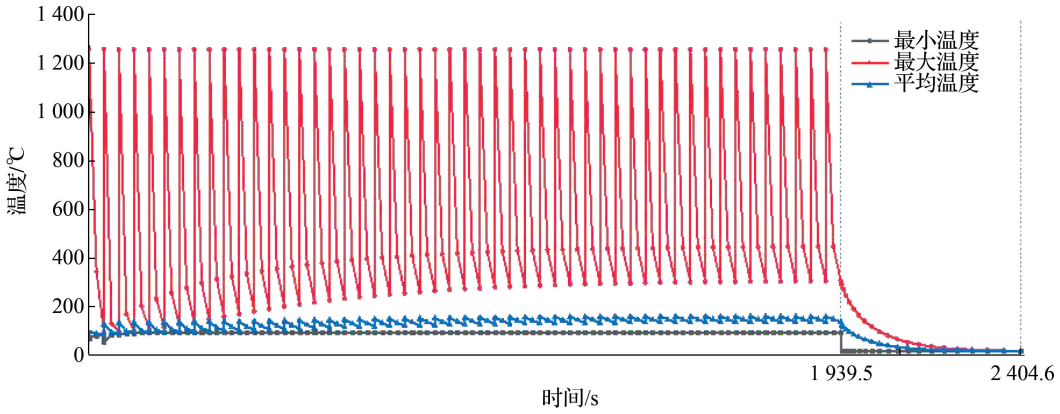


图 6　扫描速度 1 200 mm/s、铺粉厚度 0.03 mm 时温度变化

Fig. 6　Temperature changes with scanning speed of 1 200 mm/s and powder coating thickness of 0.03 mm

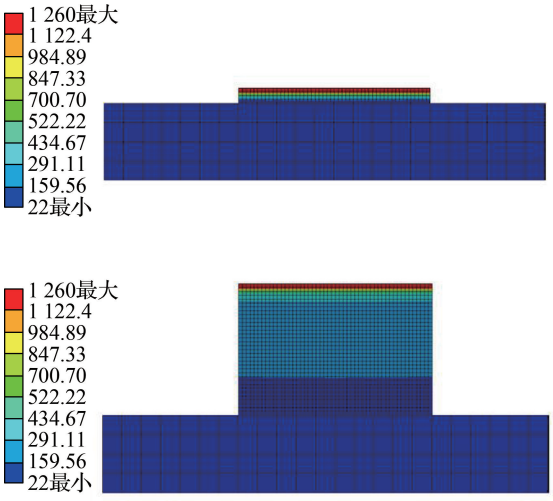


图 7　不同时刻温度轮廓图

Fig. 7　Temperature contours at different times

2.2　应力分析

通过对等效应力值与等效应力分布图对应力场进行分析。在仿真过程中,不同功率下的等效应力随时间变化趋势相同,以图 8 为例进行研究。图 8 为扫描速度为 1 200 mm/s、铺粉厚度为 0.03 mm 打印时等效应力随时间变化图。从图 8 中可以看出,应力循环曲线与温度曲线相似,均经历了多个波峰和波谷。当开始打印第一层时,激光束作用在粉末上,粉末熔化形成熔池。随着第一层激光扫描结束,熔池开始冷却,应力随着金属凝固而产生。当金属完全凝固并与基板接触时,应力迅速上升至 451 MPa。随着继续打印后续层,第一层在打印每一层时温度都会小幅度回升,但最大应力值由最高的 472 MPa 降低为 452 MPa。激光在后续打印层工作时,上一层也会存在加热作用,不均匀加热会使之前的打印层热应力上升,材料的屈服强度随升温而下降,当薄壁内应力超过材料屈服强度时,材料产生变形。此外,随着打印层数上升,打印层下部随温度降低而应力升高。

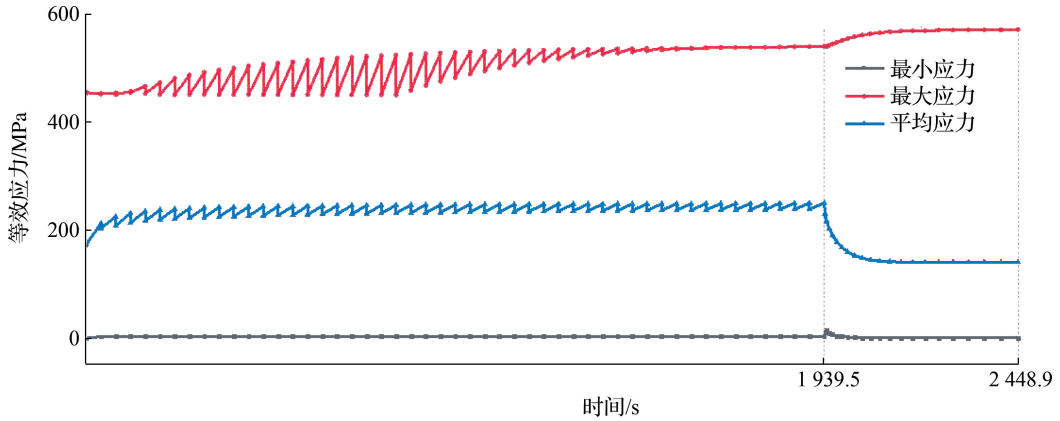


图 8　应力随时间变化图

Fig. 8　Stress-time variation diagram

图 9 显示了打印结束时的模型等效应力分布情况。从图 9 可以看出,薄壁件与基板接触的位置应力最大,在 570 MPa 左右。这是由于激光熔化粉末时产生的大温度梯度,以及基板与粉末层之间的热导率和热膨胀系数差异。在后续打印过程中最大应力变化幅度降低,是因为前几层的余热对后续层起到了保温作用,降低了温度梯度,从而减小了应力,随着散热趋于稳定,最大等效应力稳定在 538 MPa 左右。在薄壁构件成形过程中,可能会出现与基板脱离或断裂情况,尤其是在与基板接触位置的两端。成形完成后,薄壁构件两侧边缘可能会向内倾斜,上侧边缘可能出现内凹。从图 9 中可以观察到,在薄壁件与基板连接处,薄壁件受到的等效应力远大于基板所受的力,大部分等效应力集中在薄壁件下方区域。在薄壁件底部两侧和基板下方存在较大的残余应力,而薄壁件中部应力较小。基板部分的残余应力分布较为复杂,这主要是由于在实际打印过程中,基板不参与熔融过程,基板受到粉末熔融凝固后收缩产生的力以及基板下部固定在 SLM 打印机上受到打印机的约束。

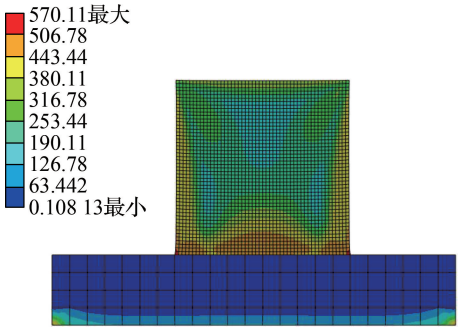


图 9 等效应力分布图

Fig. 9 Equivalent stress distribution diagram

2.3 工艺参数影响分析

通过有限元模拟对薄壁件进行仿真,表 2 为不同参数对最大尺寸偏移的影响。

图 10 为不同参数下的尺寸变化图。从图 10 可以看出,尺寸偏差随着扫描速度的增大而减小,随着铺粉厚度的增大而增大。通过数据可以看出,随着激光扫描速度的增大尺寸偏差逐渐减小。激光功率为 150 W,由于激光扫描速度增大,激光在薄壁件上停留时间、能量密度随之减小,缩小了温度梯度。当激光扫描速度过慢时,每层熔道所吸收的能量过多,熔池温度升高,会导致发生球化现象以及熔池炸裂形成孔洞等缺陷。所以提高扫描速度可以减小变形量。

表 2 有限元模拟不同参数对变形量的影响

Table 2 Influence of different parameters on the deformation of finite element simulation

序号	扫描速度/(mm·s^{-1})	铺粉厚度/mm	尺寸偏移/mm
1	800	0.03	0.42
2	1 000	0.03	0.41
3	1 200	0.03	0.39
4	800	0.04	0.49
5	1 000	0.04	0.47
6	1 200	0.04	0.45
7	800	0.05	0.51
8	1 000	0.05	0.49
9	1 200	0.05	0.48

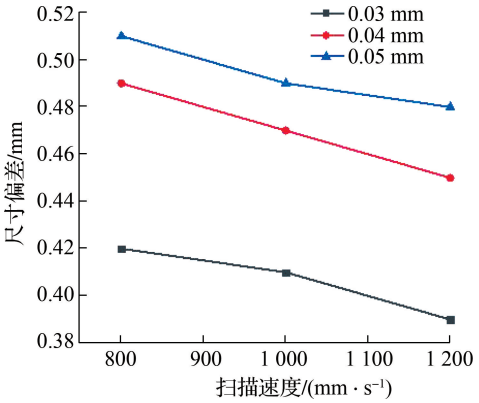


图 10 不同参数下的尺寸偏差

Fig. 10 Dimensional deviation under different parameters

随着铺粉厚度增大尺寸偏差变大,是由于随着铺粉厚度增大提升了散热效果,导致温度梯度变大,冷却后的残余应力也变大。所以随着铺粉厚度的增大,变形量呈变大趋势,而且铺粉厚度过大会导致熔道连接不充分,使零件不能成形,如图 11 所示。



图 11 由于铺粉厚度大导致打印失败

Fig. 11 Printing fails due to thick powder coating

2.4 尺寸偏移分析

本文通过实验对仿真结果分析,根据表 1 的实验进行参数设置。使用铖联激光 NCL-M2120 型号打印机进行打印,其可打印 120 mm×120 mm×200 mm

尺寸的零件,基板材料为 316L 不锈钢。使用粉末为高温合金 GH4169,粉末颗粒直径为 15～50 μm,形貌如图 12 所示。可以看出,粉末流动性能良好,能够在整个打印过程中均匀铺粉。

通过不同参数成形薄壁件,沿着高度方向左右两侧选取 10 个点,利用二坐标测量仪进行测量,并选取最大变形量作为尺寸偏移值进行验证,实际测量最大值如表 3 所示。与表 2 对比可知,所得变化趋势与仿真结果一致,故可得结论,扫描速度增大尺寸偏移减小,铺粉厚度增大尺寸偏移增大。

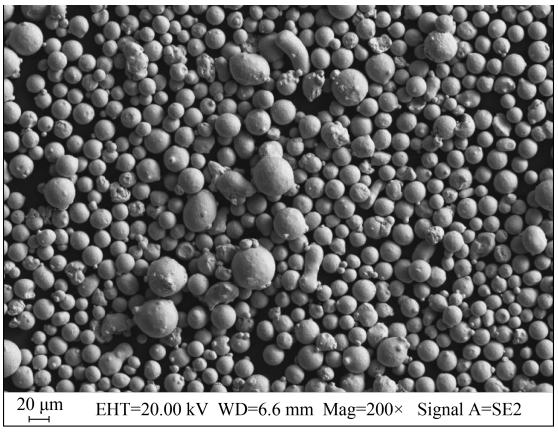


图 12　GH4168 粉末 SEM 图

Fig. 12　SEM image of GH4168 powder

表 3　实际打印不同参数对变形量的影响

Table 3　Influence of different parameters on actual printing deformation

序号	扫描速度/(mm·s^{-1})	铺粉厚度/mm	尺寸偏移/mm
1	800	0.03	0.43
2	1 000	0.03	0.40
3	1 200	0.03	0.39
4	800	0.04	0.43
5	1 000	0.04	0.42
6	1 200	0.04	0.42
7	800	0.05	0.47
8	1 000	0.05	0.46
9	1 200	0.05	0.44

图 13 为打印表面样貌图。9 个加工参数形成的熔道宽度均较为规则,未发现沉积层中间的孔洞缺陷。当扫描速度较慢时,激光作用在粉末上的时间较长,单位体积的粉末吸收能量较高,打印效果较差。随着扫描速度升高,薄壁件的表面质量相对较好。随着铺粉厚度增大,薄壁件表面的熔道宽度逐渐增大,是由于粉末熔化程度较低,当粉末厚度适中时,激光扫过粉末能充分吸收能量,反应效率较高,熔池与熔道形成也较稳定。随着熔池冷却凝固,零件的致密度也较好。过厚的粉末会因为下层粉末吸收能量不足,导致表面成形效果不佳。

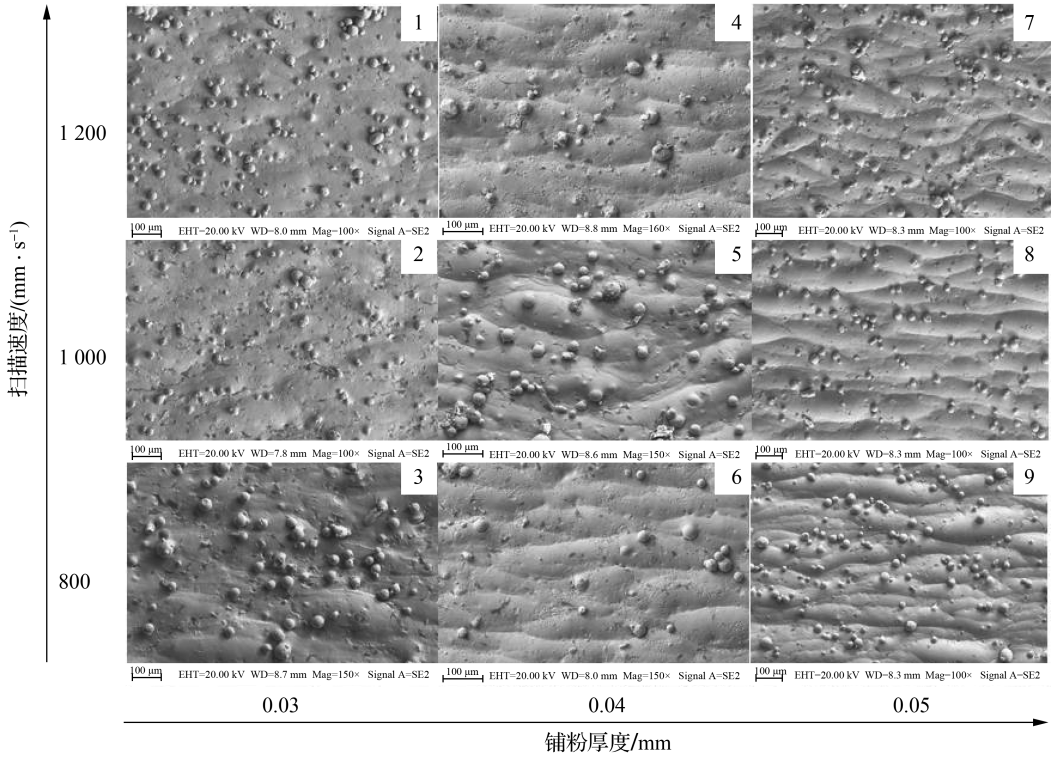


图 13　表面样貌图

Fig. 13　Surface appearance diagram

3 结论

本文利用 ANSYS 软件进行 SLM 成形高温合金 GH4169 薄壁件,通过对温度场与应力场的分析,并经过实验验证得出以下结论。

(1) 建立了瞬态热-静态结构耦合场有限元模型,在温度变化、热场分布、变形情况以及应力分布等方面与实验结果较符合,从多个方面对 SLM 成形 GH4169 薄壁件的温度场与应力场进行研究验证。

(2) 通过增大扫描速度,可以减小能量密度,降低打印时间,从而减小温度梯度,降低应力。所以可以适当提高扫描速度来提高薄壁件的尺寸精度,扫描速度为 1 200 mm/s 时打印效果较好。

(3) 增大铺粉厚度会导致温度梯度增大,冷却后的残余应力随之增大,导致尺寸偏差变大。然而,铺粉厚度过大可能导致粉末烧结不充分,影响打印质量。当铺粉厚度为 0.03 mm 时,打印质量较好。

(4) 通过实验验证,实际变形数据与有限元模拟方法的结果相同,证明通过有限元方法可以有效地模拟 SLM 打印过程中的变形情况。

参考文献:

[1] 张国会,郭绍庆,黄帅,等. 选区激光熔化技术制备 GH4169 合金的致密度研究[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(3):031404.

[2] JIA Haolin, SUN Hua, WANG Hongze, et al. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113: 2413-2435.

[3] SEFENE E M. State-of-the-art of selective laser melting process: a comprehensive review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 63: 250-274.

[4] GAO Bingwei, ZHAO Hongjian, PENG Liqing, et al. A review of research progress in selective laser melting (SLM)[J]. Micromachines, 2022, 14(1): 57.

[5] 姜旭,周六如,毕凤阳,等. 激光选区熔化成形半圆孔悬垂结构变形及残余应力研究[J]. 制造技术与机床,2023(8):27-31.

[6] 杜世浩,韩志杰,高雪强,等. SLM 成形多层多道金属薄壁件温度场有限元模拟[J]. 河北科技大学学报,2023,44(4):335-345.

[7] 许明三,江尧峰,姚耀伍,等. SLM 成形薄壁件尺寸偏差预测与控制研究[J]. 精密成形工程,2023,15(2):86-94.

[8] 姚少科,彭青,李正阳. 高度对激光沉积薄壁件残余应力分布的影响[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(7):0714007.

[9] HINTZE W, VON WENSERSKI R, JUNGHANS S, et al. Finish machining of Ti6Al4V SLM components under consideration of thin walls and support structure removal [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 48: 485-491.

[10] ZHANG Yingfeng, MAJEED A, MUZAMIL M, et al. Investigation for macro mechanical behavior explicitly for thin-walled parts of AlSi10Mg alloy using selective laser melting technique[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66(2): 269-280.

[11] LU Xin, LI Mengnie, YANG Hongbin. Geometric characteristics of AlSi10Mg ultrathin walls fabricated by selective laser melting with energy density and related process parameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(11/12): 3773-3790.

[12] LU Qiyue, RIZWAN-UDDIN. A finite element approach for nonlinear, transient heat conduction problems with convection, radiation or contact boundary conditions[J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 193: 110009.

[13] KHAN N A, SULAIMAN M, KUMAM P, et al. Thermal analysis of conductive-convective-radiative heat exchangers with temperature dependent thermal conductivity[J]. IEEE Access, 2021, 9: 138876-138902.

[14] PRISCO U. Shape of the melt pool produced by a moving Gaussian heat source[J]. Welding in the World, 2021, 65(11): 2105-2118.

[15] 严深平,张安峰,梁少端,等. 激光增材制造技术常用金属材料激光吸收率测量[J]. 航空制造技术,2017,60(17):97-100.

[16] 吴俣,马朋召,白文倩,等. 不同扫描策略下 316L/AISI304 激光熔覆过程中温度场-应力场的数值模拟[J]. 中国激光,2021,48(22):202002.

[17] GIRALDO-LONDOO O, PAULINO G H. A unified approach for topology optimization with local stress constraints considering various failure criteria: von Mises, Drucker-Prager, Tresca, Mohr-Coulomb, Bresler-Pister and Willam-Warnke[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2020, 476(2238): 20190861.

[18] 赵国栋,王昊,赵建平. GH4169 激光选区熔化成形残余应力数值模拟研究[J]. 电焊机,2022,52(7):7-17.

[19] 吴承隆,尹浩,黄泽涵. GH4169 镍基高温合金脉冲激光焊工艺参数优化[J]. 工具技术,2020,54(10):38-42.

(责任编辑:褚金红 实习编辑:张昌保)