

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.039

基于数值仿真的选区激光熔化压力管道元件变形控制研究

吴胜平¹, 金志², 郑逸翔¹, 王国强², 戴维弟², 郑德全²

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210009; 2. 南京晨光集团, 江苏 南京 210006)

摘 要:通过实验确定 316L 不锈钢选区激光熔化工艺参数范围, 在激光能量密度处于 $54.54 \text{ J/m}^3 \sim 83.33 \text{ J/m}^3$ 时, 能够保证成形致密度大于 99.5, 材料内部几乎不存在匙孔与未熔合。基于数值仿真技术, 分析不同支撑下选区激光熔化成形后三通的应力及变形量, 获得选区激光熔化工艺过程中的风险点, 进而对支撑进行迭代优化, 零件的最大变形量由 2.18 mm 降至 1.96 mm, 变形量主要分布区域由 0.6 mm 左右降至 0.3 mm~0.6 mm。根据支撑优化结构打印出三通零件, 成形后零件未出现开裂等问题, 尺寸均满足设计要求。

关键词:选区激光熔化; 数值仿真; 变形控制

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0187-05

Research on Deformation Control of Selective Laser Melting Pressure Pipeline Elements Based on Numerical Simulation

WU Shengping¹, JIN Zhi², ZHENG Yixiang¹, WANG Guoqiang², DAI Weidi², ZHENG Dequan²

(1. Jiangsu Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute, Nanjing 210009, China;

2. Nanjing Chenguang Group, Nanjing 210006, China)

Abstract: This paper determines the parameters range of 316L stainless steel selective laser melting process through experiments to ensure the molding density greater than 99.5 when the laser energy density is $54.54 \text{ J/m}^3 \sim 83.33 \text{ J/m}^3$, with almost no keyhole and non-fusion left inside the material. Based on numerical simulation technology, the stress and deformation of tee after selective laser melting forming under different supports are analyzed, the risk points in the process of selective laser melting are obtained, and the support is optimized iteratively. The maximum deformation of the part is reduced from 2.18 mm to 1.96 mm, and the main distribution area of the deformation is reduced from 0.6 mm to 0.3 mm - 0.6 mm. According to the optimized structure of the support, the three-way parts are printed with no cracking and their sizes all meeting the requirements as designed.

Keywords: selective laser melting; numerical simulation; deformation control

0 引言

金属增材制造(additive manufacturing, AM)具有独特的优势, 推动着制造业的发展。其中选区激光熔化(selective laser melting, SLM)的发展日趋成熟, 其通过将三维模型转化为一系列离散的二维薄层, 采用高能激光束作用在平铺的粉末上选择性熔化并逐层堆叠, 实现三维实体的快速、小批量制造, 极大地降低了生产周期, 在航空航天、生物医疗领域得到广泛的应用^[1-3]。压力管道元件是工业领域中最常见的关键构件之一, 由于长时间服役于高压的严苛条件下, 难以避免地发生失效现象。由于服役环境或服役地点偏远等问

题, 使构件更换成为难以解决的问题。而增材制造可快速、小批量地实现构件制造, 成为压力管道元件更换的实现途径之一。但是, 由于增材制造过程中激光能量输入大、凝固速率极快等问题, 导致了成形过程中凝固路径完全偏离平衡凝固并产生较大的热应力, 反映在零件上就会形成微观组织偏析、孔隙、翘曲、裂纹、精度超差等问题^[4-6], 进而影响制件力学性能与成形质量。工艺优化过程若仅靠实验完成将耗费大量时间和精力, 成本较高。近年来, 随着计算机计算能力的飞速提升, 模拟计算手段越来越多地运用在了材料科学领域。故本文将通过工艺仿真加实验验证的方式对压力管道元件增材制造过程进行优化。

基金项目:江苏省特种设备安全监督检验研究院科技计划项目(KJ(Y)2023023)

第一作者简介:吴胜平(1976—), 男, 江苏靖江人, 正高级工程师, 本科, 研究方向为承压类特种设备安全技术, wspcn@sina.com。

目前针对增材制造工艺过程的仿真研究有很多,如姚化山等^[7]通过 Ansys 有限元软件对 SLM 增材制造过程中的温度场变化进行计算,结果发现激光前端较大的温度梯度、较高的扫描速率会导致成形过程中粉末熔化不充分;徐海岩等^[8]研究了离焦距离、 z 轴移动量对增材制造 316L 薄壁件的影响,建立了计算模型,并最终打印了精度高、质量好的 316 薄壁结构;石齐民等^[9]使用 Ansys 软件构建了复合材料 TiC/Inconel718 增材制造成形过程仿真模型,并对成形质量进行了有效预测。

综合以上文献可知,仿真在增材制造过程中的使用已经相当普遍。本文将以工业常见的 316L 合金粉末为原材料,通过 Simufact Additive 软件,对 316L 选区激光熔化参数进行仿真优化,并配合实验加以证明。在确定打印参数后,继续通过仿真软件对压力管道元件的增材制造过程进行迭代优化,进而指导零件增材制造过程,并顺利

成形合格零件。

1 实验材料与方法

本实验原材料采用雾化法生产的 316L 不锈钢粉末。粉末粒径主要分布在 $15\ \mu\text{m} \sim 53\ \mu\text{m}$ 之间,并且整体符合正态分布,从扫描电镜下观察粉末形貌,粉末均呈规则球状且均匀性、表面粗糙度较好,如图 1 所示。粉末流动性分布在 $15\ (\text{s}/50\ \text{g})$ 上下,具有良好的流动性。粉末的质量分数完全符合国标要求,如表 1 所示。

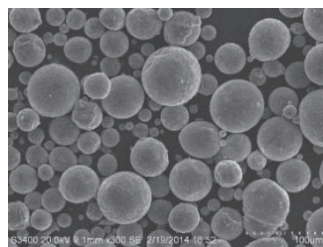


图 1 316L 粉末形貌

表 1 316L 粉末质量分数

单位:wt. %

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
标准要求	≤ 0.030	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.030	≤ 0.045	16.00~18.00	10.00~14.00	2.00~3.00
实测值	0.004	0.14	0.90	0.003	0.012	16.80	11.82	2.51

选区激光熔化设备选用雷尼绍 AM400,其最大成形尺寸为 $250\ \text{mm} \times 250\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$,激光器最大功率为 $500\ \text{W}$,扫描层厚可调节 $20\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$,最大扫描速率为 $2\ 000\ \text{mm/s}$ 。

仿真软件采用的是 MSC 软件公司研发的 Simufact Additive 增材制造模拟软件,计算所需模型可兼容 UG、CROE 等三维建模软件输出 STL、STEP 等格式文件。

2 实验设计

整体实验思路如图 2 所示,在确认试验粉末

合格后,结合已有铁基合金的工艺参数,初步确定工艺参数范围,在该范围内打印试块进行实验验证,分析试块致密度、显微组织缺陷情况以及试块硬度,验证较优的 316L 增材制造工艺参数范围。对增材制造过程工艺级参数进行仿真,分析应力、应变结果,选定 316L 增材制造工艺参数范围;确认打印参数后进行压力管道元件增材制造,通过仿真结果不断循环优化支撑设计,最终成形高质量零件。

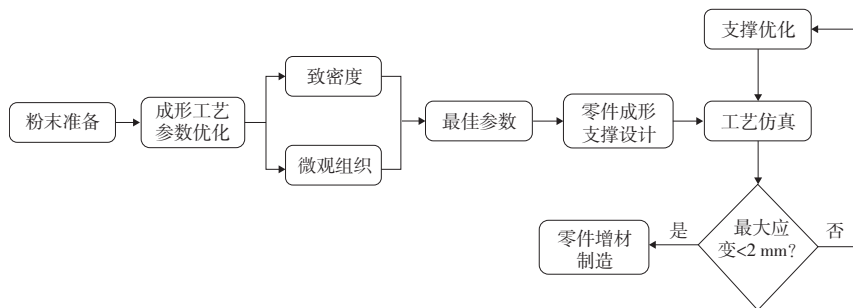


图 2 技术路线图

3 参数分析与优化

3.1 工艺参数对 316L 成形密度的影响

在增材制造过程中,致密度是作为考量成形质量的重要指标,本实验通过阿基米德排水法测得到不同打印参数下试块的致密度,如表 2 所示。可以发现,当激光功率由 100 W 上升至 300 W 时,试块密度也随着逐步提升,当功率达到 200 W 后,进入平稳期,致密度均高于 99.5,达到增材制造件致密度要求;当曝光时间从 40 μs 提高至

120 μs 时,试块致密度也呈现出上升趋势,由最低的 96.61 上升至 99.73。可以发现,当曝光时间降低至 60 μs 时,材料致密度降低至 99.05,已经不能满足增材制造构件致密度要求;扫描道间距对于致密度的影响与其他两者不同,随着扫描道间距的提高,致密度逐渐降低,当道间距达到 0.13 mm 时,材料致密度已不能满足要求。综合上述结论,材料致密度实际与激光的能量密度相关,激光功率的下降、曝光时间的降低以及道间距的提升,均导致了激光在单位面积上输出的能量降低,因此造成了材料致密度不满足要求的情况。

表 2 不同工艺参数成形试块的致密度

激光功率/W	致密度	曝光时间/ μs	致密度	道间距/mm	致密度
100	96.75	40	96.61	0.07	99.55
150	98.83	60	99.05	0.09	99.63
200	99.75	80	99.61	0.11	99.59
250	99.71	100	99.73	0.13	99.31
300	99.59	120	99.69	0.15	98.47

3.2 工艺参数对 316L 成形显微组织的影响

从增材制造 316L 不锈钢试块侧面金相观察到明显的“鱼鳞”状组织,且晶粒为由底部向顶面生长的柱状晶。这是由于在激光熔化粉末后形成熔池,熔池上下存在较大温差,熔池凝固便沿着热流的反方向发生定向凝固。金相组织对比如图 3 所示。

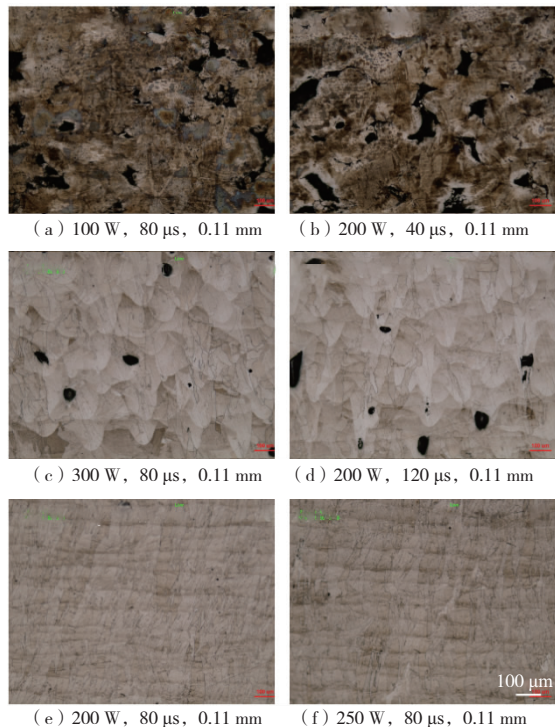


图 3 不同工艺参数下 316L 金相组织对比图

从图 3(a)—图 3(b) 可以看到金相组织中存在大量形状不规则的层间或跨多层的孔隙。这是由于激光输入能量密度过低,导致熔化不充分形成的未熔合,将未熔合部分放大,会观察到其中存在未完全熔化的金属粉末。大量的未熔合导致了材料致密度大幅下降。根据图 3(c)—图 3(d) 金相图片来看,组织中仍然存在不规则孔隙,放大看孔隙中不存在大量未熔金属粉末,这是由于激光输入能量密度过高,金属粉末在接收激光的瞬间发生汽化,气体逸出时导致了扫描路径变得不稳定,最终形成了空腔。此类空腔在冷却过程中由于压力平衡作用发生塌陷,最终形成孔隙,称之为匙孔。匙孔的出现在一定程度上也影响了材料整体成形密度,这解释了材料高激光功率、高曝光时间条件下密度降低的原因。在图 3(e)—图 3(f) 金相中存在一定量的规则圆形小孔隙,尺寸在 10 μm ~80 μm 不等,通常认为此类孔隙为气体在打印过程中来不及逸出形成的气孔,在任何打印参数下都可能随机产生,一般不影响材料性能。

随着激光能量密度的上升,材料成形内部缺陷由未熔合转变为匙孔,两种缺陷均会导致材料成形密度降低。结合金相分析结果与致密度来看,当能量密度处于 54.54 J/mm^3 ~83.33 J/mm^3 范围内时,材料内部未熔合与匙孔类缺陷含量较低,为较佳的材料打印参数范围。

3.3 压力管道元件增材制造仿真循环优化

采用 Simufact 仿真软件对压力管道元件(等径三通)的成形过程进行分析,并通过成形过程中支撑形式的改变,分析成形应力、应变分布情况,明确打印风险区域,提出工艺优化方案。结合仿真结果设计并优化支撑与零件毛坯,采取优化之后的支撑进行模拟,通过分析各过程中零件的应力、应变分布情况,明确优化措施是否有效,从而得到零件后续实际打印模型。本次仿真采用的打印参数为:打印功率 200 W、曝光时间 80 μs 、扫描道间距 0.11 mm。

零件成形过程中,当零件存在悬垂面、大倾斜角等无法成形的特殊结构时,会导致仿真结果出现极大的应变,最终无法成形。因此仿真前需对特殊位置添加必要支撑。图 4(a) 是利用 magics 软件支撑生成的简单支撑,图 4(b) 为应力仿真结

果。图中可以看出,等径三通整体成形应力较为均匀,最大应力在 600 MPa 左右。图 4(c) 为应变仿真结果,从图中可以看出,三通悬垂弧面上以及与垂直部分的拐角处发生大量变形,最大变形可达 2.18 mm,变形量集中位于 0.6 mm 左右。这是由于支撑打印高度过高,导致支撑本身产生较大成形应力。支撑上的应力分布由基板往上逐渐增加,直至与实体连接处产生了超过 1.5 mm 的仿真应变,最终承担不了实体零件的成形应力,产生较大变形。拐角处的变形是由于此处存在一定程度的悬垂面,由于三通直径较大,故转角处会形成较大的圆角,在竖直放置成形时,此处圆角未达到自动生成支撑的 45° 临界角度,因此没有自动添加上支撑导致了最终出现较大的变形(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

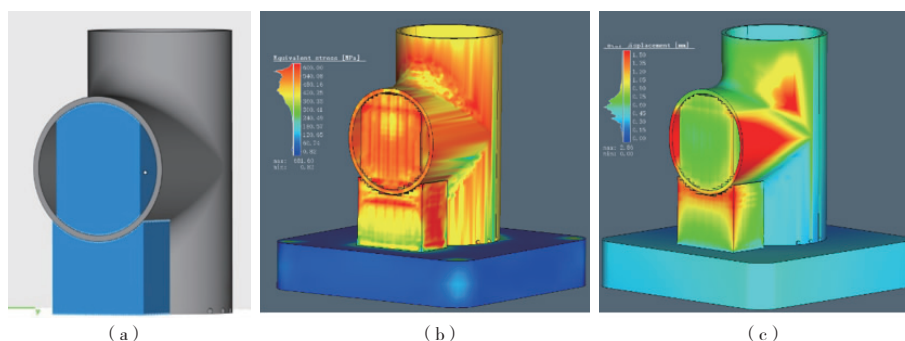


图 4 构件简单支撑及成形后的应力及位移分布

针对图 4 的仿真结果,识别出等径三通在成形过程中的风险点并进行了首轮支撑优化。优化过程采用了圆角、倒角降低结构应力集中、增加材料、提高结构自身刚度、增加余量等措施,降低各部位高变形、高应力导致的成形风险。如图 5(a) 所示,整体三通与基板相连的部分添加了 5 mm 左右的圆角,用于降低零件与基板连接处开裂的风险;等径三通的悬垂部分使用了两种优化方式,首先在圆孔内部添加了盖板,盖板与零件实体连接的部分为宽度 1 mm 左右的接触点链接,用于提高其在成形过程中整体的抗变形能力,盖板表面带有加强筋,以提高整体刚性。图 5 仿真结果表明,支撑过高可能会导致支撑与零件接触时产生较大应变,影响零件成形精度。针对此情况,本实验在零件内部与外部均添加了部分实体,降低支撑成形高度,避免了支撑在成形过程中由于较大应变产生变形,损坏刮刀,进而影响零件整体成

形。同时,实体也可作为零件的随炉试样,进行力学性能测试。针对拐角处没有做实体增强,而是通过在拐角的内表面添加少量 block 支撑的形式优化。图 5(b)—图 5(c) 为优化后零件整体应力应变情况,可以看到优化后整体应力情况与改善前类似且分布较为均匀,虽然最大应力达到 600 MPa 左右,但 316L 不锈钢塑性很高,打印过程中不会存在开裂风险。从应变的结果来看,优化结果都取得了一定的成效。三通悬垂面变形量达 1.5 mm 的位置几乎得到了消除,最大变形量为 1.98 mm,零件变形量集中位于 0.3 mm~0.6 mm 之间。但是拐角处的成形变形量依然较大。

拐角处仍然存在的较大应变,表明此处添加较弱的 block 支撑是不足以控制此处变形的。因此,本实验在模型上对应的拐角处添加了更强的轮廓支撑,如图 6(a) 所示,支撑底部落在实体上,在打印过程中控制拐角处变形。图 6(b) 为优化

后的应变仿真结果,可以发现拐角处的应变得到了极大地降低,处于 1 mm 以下水平。其他位置的变形量与优化前相当,这证明了此方法的有效

性。图 6(c) 为采用本文优化后的实验参数与支撑方式打印的实体零件,经测量零件尺寸均符合公差要求。

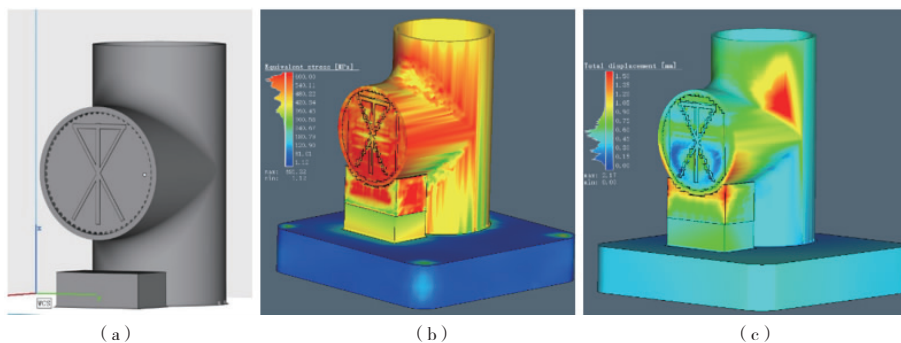


图 5 构件优化支撑及成形后的应力及位移分布

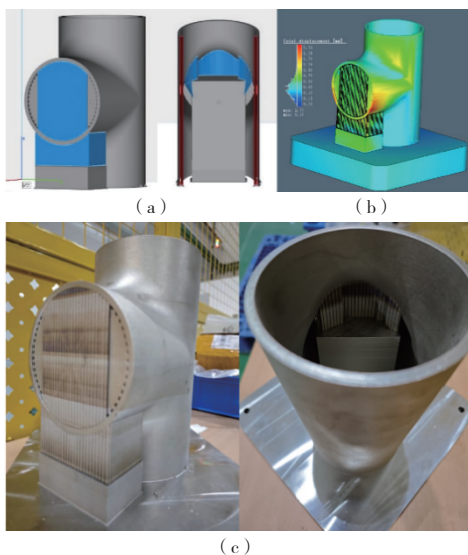


图 6 构件二次优化后的支撑及成形后的位移分布与实体零件

4 结语

1) 综合分析材料致密度并观察不同工艺参数下成形试块金相显微组织,发现较高的激光能量密度会导致成形过程中粉末汽化并大量溢出,最终形成匙孔,较低的能量密度会导致成形过程中粉末不能完全熔化,形成大量粉末未熔合。这些缺陷最终影响材料成形质量与性能,通过计算最佳工艺参数应将激光能量密度控制在 $54.54 \text{ J/mm}^3 \sim 83.33 \text{ J/mm}^3$ 之间。

2) 采用混合支撑设计的方式对不锈钢三通进行增材制造成形支撑设计,通过工艺仿真,评价支撑设计效果并进行迭代优化。经过优化后,零件

最大变形量由 2.18 mm 降至 1.96 mm,变形量主要分布区域由 0.6 mm 左右降至 0.3 mm~0.6 mm,大变形量存在面积大幅降低,保证了实体尺寸在设计要求范围内。

参考文献:

- [1] 黄卫东,李延民,冯莉萍,等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程,2002,30(3):40-43,27.
- [2] 胡捷,廖文俊,丁柳柳,等. 金属材料在增材制造技术中的研究进展[J]. 材料导报,2014,28(增刊2):459-462.
- [3] 廖文俊,胡捷. 增材制造技术的现状和产业前景[J]. 装备机械,2015(1):1-7.
- [4] 石磊,雷力明,王威,等. 热等静压/热处理工艺对激光选区熔化成形 GH4169 合金微观组织与拉伸性能的影响[J]. 材料工程,2020,48(6):148-155.
- [5] 孙靖,吴士明,陈艳,等. 激光选区熔化成形 316L 中孔洞类型及产生机理[J]. 电焊机,2021,51(8):123-127,181.
- [6] 许明三,张正,黄旭. 能量密度对 SLM 成形 316L 致密度与耐磨性能的影响研究[J]. 应用激光,2021,41(3):431-438.
- [7] 姚化山,史玉升,章文献,等. 金属粉末选区激光熔化成形过程温度场模拟[J]. 应用激光,2007,27(6):456-460.
- [8] 徐海岩,李涛,李海波,等. 激光熔覆成形薄壁件离焦量和 Z 轴提升量选择方法[J]. 大连理工大学学报,2017,57(6):557-563.
- [9] 石齐民,顾冬冬,顾荣海,等. TiC/Inconel 718 复合材料选区激光熔化成形的热物理机制[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(6):1543-1550.

收稿日期:2024-07-25