

激光粉末床熔融 316L 薄壁结构工艺优化与熔池热动力学研究

戴延丰¹ 阮佳生² 赵崇亮² 王焱辉²

(1. 中航工业金城南京机电液压工程研究中心, 南京 211106; 2. 广东汉邦激光科技有限公司, 中山 528427)

摘要 基于面向航空散热薄壁蜂窝构件一体成形需求, 提出了基于激光粉末床熔融(LPBF)超细光斑和工艺参数优化方法, 直接成形了最小壁厚约为 100 μm 的薄壁蜂窝结构, 研究了激光光斑直径对沉积单道形貌和宽度的影响以及超细光斑下成形工艺参数(激光功率和扫描间距)对成形 316L 构件致密度、熔池形貌、尺寸精度的影响。基于有限体积方法建立了 LPBF 介观尺度多相物理模型, 揭示了 LPBF 成形 316L 合金激光扫描间距对非平衡熔池温度场、速度场、残余孔隙与表面质量的影响, 明晰了搭接区域温度场、熔体润湿铺展、熔体热毛细流动对熔池自由面波动和搭接区致密化的作用机制。

关键词 激光粉末床熔融; 热动力学; 316L 不锈钢; 表面形貌

中图分类号 TG402; TP311; TG142.71

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250098

Process Optimization and Molten Pool Thermodynamics of Laser Powder Bed Fused 316L Thin-walled Structures

DAI Yanfeng¹, RUAN Jiasheng², ZHAO Chongliang², WANG Yanhui²

(1. AVIC Jincheng Nanjing Electromechanical and Hydraulic Engineering Research Center, Nanjing 211106;

2. Guangdong Hanbang Laser Technology Co., Ltd., Zhongshan 528427)

Abstract: Aiming at integrated forming demand for aviation cooling thin-walled honeycomb components, the thin-walled honeycomb structure with a minimum wall thickness of $\sim 100 \mu\text{m}$ was fabricated by LPBF ultrafine spot and optimized process parameters. Effects of laser beam size on the morphology and width of deposited single pass were investigated. The influence of process parameters (laser power and scanning spacing) with ultrafine laser beam on the density, molten pool morphology and dimensional accuracy of formed 316L components was analyzed. A mesoscale multiphase physical model of LPBF was established based on the finite volume method to reveal the influence law of laser scanning spacing on the temperature field, velocity field, residual pores, and surface quality of non-equilibrium molten pool in LPBF formed 316L alloy. The action mechanisms of temperature field, melt wetting and spreading, melt thermal capillary flow on fluctuation of free surface of molten pool and densification of overlap zone were clarified.

Key Words: Laser Powder Bed Fusion, Thermodynamics, 316L Stainless Steel, Surface Morphology

收稿日期: 2025-03-03; 修订日期: 2025-04-08

基金项目: 江苏省重点研发计划资助项目(BE2022069-5)

第一作者: 戴延丰, 男, 1983 年出生, 高级工程师, E-mail: dyf27j@126.com

引用格式: 戴延丰, 阮佳生, 赵崇亮, 等. 激光粉末床熔融 316L 薄壁结构工艺优化与熔池热动力学研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(1): 41-46.

DAI Y F, RUAN J S, ZHAO C L, et al. Process optimization and molten pool thermodynamics of laser powder bed fused 316L thin-walled structures[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(1): 41-46.

- [16] SIVAPRAKASAM P, HARIHARAN P, GOWRI S, et al. Modeling and analysis of micro-WEDM process of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using response surface approach[J]. Engineering Science and Technology, 2014, 17(4): 227-235.
- [17] HAMAD A R, ABOUD J H, SHUAIB F M, et al. Surface hardening of commercially pure titanium by laser nitriding: Response surface analysis[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(4): 674-679.
- [18] ALTARAZI S, HIJAZI L, KAISER E, et al. Process parameters optimization for multiple-inputs-multiple-outputs pulsed green laser welding via response surface methodology[C]//2016 IEEE International Conference on industrial engineering and engineering management (IEEM). IEEE, Bali, Indonesia, 2016.
- [19] 唐学峰. IN718 合金环件径向轧制微观组织演变建模与仿真研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [20] 黄烁, 王磊, 张北江, 等. GH4706 合金的热变形行为与显微组织演化[J]. 材料工程, 2015, 43(2): 41-46.
- [21] XIAO Z B, WANG Q, HUANG Y H, et al. Hot deformation characteristics and processing parameter optimization of Al-6.32Zn-2.10Mg alloy using constitutive equation and processing map[J]. Metals, 2021, 11(2): 360-377.
- [22] 唐丽丽, 单琳, 张云龙, 等. 烧结压力对 β -SiC_p/Cu 复合材料组织结构及热物性的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(4): 30-33.
- [23] 宁永权, 姚泽坤, 傅明旺, 等. 基于热加工图研究粉末高温合金的热变形行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, A39(1): 231-234.
- [24] 王俊, 王克鲁, 鲁世强, 等. 基于响应面法的 NiTi 形状记忆合金热成形工艺参数优化[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(6): 157-164.

(编辑: 刘晨辉)

航空航天、武器装备等高端装备领域普遍采用薄壁结构件以实现特殊的热电等功能^[1-3],该类薄壁件具有大角度非线性扭转、截面空间异形等结构特征,以数控铣削、充液压制及冲压与拼焊的分体成形等工艺存在内部结构工艺干涉、材料利用率低、周期较长等问题,同时面临轻量化约束下的性能和功能特殊工况需求难以满足的难题^[4-6]。激光粉末床熔融(Laser powder bed fusion, LPBF)是一种基于粉床原理的金属增材制造技术,利用激光辐照热源按切片数据和扫描工艺周期性熔融构件二维截面后,并沿成形方向形成材料层间冶金结合以最大自由度地实现复杂构件的一体制造^[7-8]。通常 LPBF 成形的最小壁厚为 150~200 μm ,因此面临最小壁厚约为 100 μm 的复杂薄壁结构一体成形需求。同时,LPBF 成形过程复杂且多形式的热质动传输行为对调控薄壁质量和稳定成形增加了复杂度^[9-10]。

研究者对 LPBF 成形薄壁结构开展了相关研究。彭凯等^[11]利用数值仿真和试验方法研究了 LPBF 成形钛合金薄壁件热行为和打印极限高度,揭示了单层单道、单层多道和多层单道模式下的薄壁结构的温度场和温度梯度演变行为,明晰了激光功率和扫描速度对薄壁结构极限高度的影响规律。XIE Y J 等^[12]研究了 LPBF 激光功率和扫描速度对 W 合金薄壁结构壁厚和表面形貌的影响,发现壁厚与激光功率表现为正相关,而随着扫描速度增加呈指数级下降。DING J H 等^[13]利用数值模拟和半解析法研究了 LPBF 成形薄壁网壳结构的几何偏差及其补偿方法,揭示了熔池深度引起的阶梯效应、压缩引起的增厚效应和刮擦引起的减薄效应对薄壁结构厚度的影响,实现了厚度为 135 μm 和 185 μm 的薄壁几何偏差控制在 10 μm 以内的目标。ZHANG L 等^[14]利用数值仿真和试验方法研究了 LPBF 成形三重周期极小曲面 TPMS 的尺寸精度、压缩性能和吸能变化规律,通过 CT 测试观察到 TPMS 结构水平壳厚度比垂直壳高出了 76%。此外,LPBF 成形薄壁结构壁面粘粉效应会显著影响结构壁厚和表面质量,增加压降并提高热阻,并限制了薄壁结构的轻量化^[15];LIU Z Q 等^[16]研究得出结构的弹性模量、屈服强

度和抗拉强度由于结构设计尺寸与打印尺寸的偏差可分别达 18.1%、17.6% 和 27%。LEE J H 等^[17]研究了 LPBF 成形 TC4 壁厚对显微组织和力学性能的影响,获得的最小壁厚为 195 μm 。利用数值模拟仿真技术可有效预测 LPBF 工艺的温度场,且基于 60~70 μm 的光斑尺寸并经过工艺优化可直接成形最小壁厚为 135~195 μm 的薄壁结构,但难以满足航空领域轻量化热管理效率对尺寸约为 100 μm 的薄壁构件一体成形需求。为了实现最小壁厚约为 100 μm 复杂结构一体成形,采用 Micro-LPBF 工艺,粉末粒径为 5~25 μm ($D_{50}=16.27 \mu\text{m}$),层厚为 10 μm ,这给当前常用 LPBF 装备和粉末材料参数提出了新挑战^[18]。目前关于采用常规 LPBF 一体成形壁厚为 100 μm 构件并利用数值模拟仿真方法揭示成形过程热动力学、缺陷演变行为的报道很少。

本研究提出通过减小 LPBF 光斑直径和优化工艺参数的方法,一体成形最小壁厚约为 100 μm 的薄壁蜂窝结构,研究激光光斑直径对沉积熔道形貌和宽度以及工艺参数对成形 316L 构件致密度、熔池形貌、尺寸精度的影响。同时,基于有限体积方法,建立 LPBF 介观尺度多相物理模型,研究 LPBF 成形 316L 合金激光扫描间距对非平衡熔池温度场、速度场、残余孔隙与表面质量的影响,以期 LPBF 成形高致密和高质量薄壁结构提供参考。

1 模型建立与试验方法

利用 Cero 建立尺寸为 300 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ 的计算域模型,见图 1。将其导入 Workbench 中绘制网格及边界条件设置,网格最小尺寸为 2 μm ;在 Matlab 中输入层厚及粒径分布等参数并建立 LPBF 粉床模型(见图 1b),316L 材料热物性参数^[19]经 UDF 代码导入 Fluent 软件进行计算(图 1c),迭代时间为 $1.2 \times 10^{-4} \text{s}$ 。

LPBF 成形 316L 粉末材料会经历激光辐照、熔体润湿铺展和冷却凝固等复杂物理过程,粉末材料熔化形成的非平衡态熔池为气相和液相共存体,成形过程满足基于笛卡尔坐标系的质量、动量和能量控制方程、

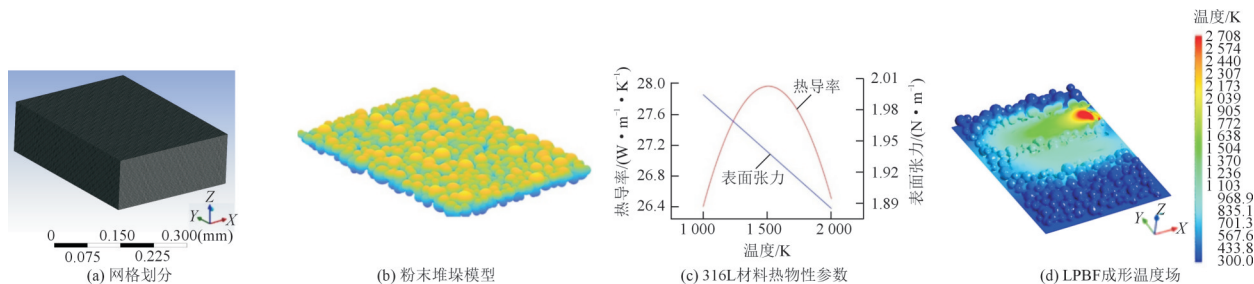


图 1 物理模型建立

Fig.1 Establishment of physical model

多相体积分数VOF能量控制方程,物理模型边界条件设置参考文献[7],数值模拟LPBF工艺参数:光斑直径 D 为30 μm ,激光功率 P 为160 W和120 W,扫描速度 v 为1 100 mm/s,层厚为30 μm ,扫描间距 h 分别为60、80和100 μm 。

LPBF成形幅面为265 mm $\times$ 170 mm $\times$ 120 mm(HBD 200),成形腔体配备Ar保护气氛、氧含量监测仪(HT-TA063)和烟尘循环过滤装置(HBD 200专用型防静电除尘净化系统)。采用创鑫CX300W激光器(最大功率为300 W)和HBD SCAN(1 064 nm)E30LD201A扫描振镜,成形光斑直径分别为30、40、50和60 μm 进行单道测试,设置对应成形工艺参数完成试样成形。利用光学显微镜(OLYMPUS BX53M)观察试样内部孔隙分布及尺寸,利用电离双束电镜(TESCAN LYRA3 GM)对试样薄壁及侧壁质量进行表征,利用照度计(ST-80C)并按GJB2367A-2005标准进行薄壁粉末结构荧光渗透检测。

2 试验结果与讨论

2.1 光斑直径对沉积单道形貌和宽度的影响规律

图2为不同激光光斑直径LPBF成形单道熔道形

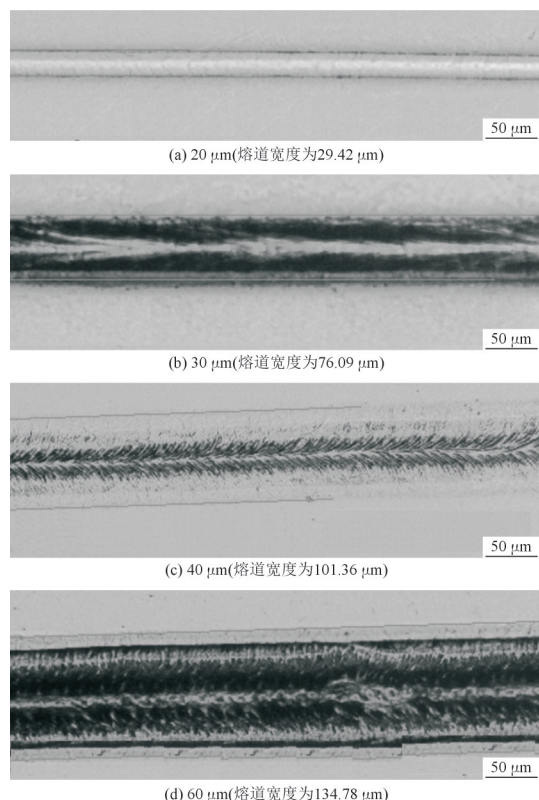


图2 不同激光光斑直径对LPBF沉积单道形貌和宽度的影响
($P=100\text{ W}$, $v=1\,100\text{ mm/s}$)

Fig.2 Effects of laser beam size on single-pass morphology and width of LPBF-deposited

貌和宽度的演变。可以看出,当光斑直径 D 为20 μm 时,沉积熔道平均宽度为29.42 μm ,过小的熔道宽度会显著增加成形时间,且沉积熔道高度并未呈有效增加(见图2a)。当光斑直径增至30 μm 时,沉积单道平均宽度为76.09 μm ,熔道表面光滑且连续(见图2b)。当光斑直径 D 增至40 μm 时,沉积单道呈现中间高而两侧低的非平整形态,热影响平均宽度增至101.36 μm 而实际有效沉积宽度仅为41 μm (见图2c)。当光斑直径进一步增至60 μm 时,沉积单道连续且均匀,但平均宽度增至134.78 μm (见图2d)。因此根据不同光斑直径下的沉积单道尺寸和形貌,本研究采用激光光斑直径 D 为30 μm 。

2.2 超细光斑约束下316L熔池和孔隙形貌演变规律

图3为不同激光功率下LPBF成形316L不锈钢材料熔池形貌及孔隙形貌演变规律。可以看出,当扫描间距 $h=100\text{ }\mu\text{m}$ 时,LPBF成形316L不锈钢材料横截面存在明显不规则残余孔隙,表明扫描道间存在由于未有效搭接而形成的不规则孔隙;当激光功率为160 W时,熔池平均宽度和深度分别为85 μm 和48 μm ,熔池交叠区域少量不规则孔隙平均尺寸为20 μm ,成形致密度为95.2%(见图3a);当激光功率降至120 W时,沉积截面不规则孔隙内存在未熔粉末,且平均尺寸增至50 μm ,成形致密度为90.6%,表明采用较小激光光斑直径30 μm 和较大扫描间距,沉积构件内已形成大量且

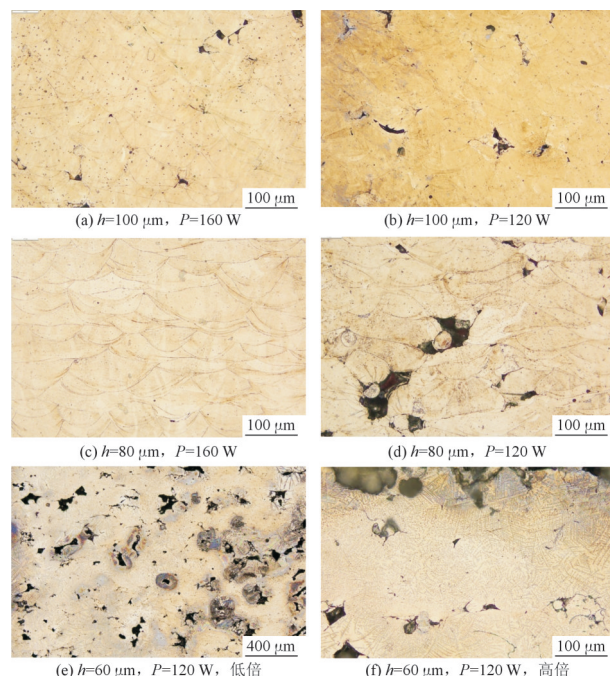


图3 不同工艺下LPBF成形316L不锈钢材料致密化及孔隙形貌(光斑直径为30 μm ,扫描速度为1 100 mm/s,层厚 l 为30 μm)

Fig.3 Relative density and residual pore morphologies of LPB-Fed 316L stainless steel under different processes

不规则大尺寸残余孔隙(见图 3b)。当扫描间距 $h=80\text{ }\mu\text{m}$ 时,LPBF 成形 316L 不锈钢材料横截面显著抑制了大尺寸不规则残余孔隙形成;当激光功率为 160 W 时,熔池平均深度减至 $39\text{ }\mu\text{m}$ 而平均宽度增至 $91\text{ }\mu\text{m}$,成形致密度为 99.5%(见图 3c),表明熔池热行为以热传导模式为主;当激光功率降至 120 W 时,熔池搭接区和层间出现大尺寸不规则孔隙,孔隙内存在大量未熔粉末,熔池边界发生明显扭转且尺寸波动较大,成形致密度为 75.1%(见图 3d),表明低激光功率易在层或道间形成未完全熔融引起的不规则孔隙,进而显著降低沉积致密度。当扫描间距进一步减至 $60\text{ }\mu\text{m}$ 时,LPBF 成形构件横截面呈现大尺寸且不规则的残余孔隙,成形致密度为 70.3%(见图 3e),这主要归因于材料显著气化引起的反冲压力和熔池底部界面不稳定而形成的残余孔隙(见图 3f)。

2.3 激光粉末床熔融 316L 熔体速度场和搭接效果

图 4 为不同工艺参数下激光粉末床熔融成形 316L 合金熔池速度场与搭接区域致密化行为。可以看出,当扫描间距为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 、激光功率为 120 W 时,沉积熔道表面光滑连续,但熔道间存在明显的未熔粉末颗粒,表明

熔道间未形成有效搭接,进而显著降低了致密度(见图 4a);进一步分析熔道横截面可以发现,熔道搭接区域存在明显的未熔合区和搭接间隙,进而促使形成冶金缺陷——不规则孔隙(见图 4b);由熔池速度场分析可知,高斯激光辐照区域热量集中在熔池前部区域,前部熔体流速显著大于熔池后部区域,且熔体未有效向粉末床进行润湿和铺展(见图 4c)。当扫描间距为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 而激光功率增至 160 W 时,相邻沉积道表面致密且光滑,未发现存在明显孔隙(见图 4d);结合相邻熔道搭接区域横截面云图,可以发现,熔体材料在搭接区域形成了致密区且与保护气氛形成明显的自由气液界面,气液界面有效隔绝熔体材料和保护气体,进而有助于形成致密凝固区(见图 4e);进一步分析熔池速度场可知,激光辐照熔池速度矢量呈外流向模式,表明熔池材料可有效与相邻材料进行润湿和铺展,进而相邻两道熔融 316L 材料可进行快速致密化并获得致密凝固材料(见图 4f)。当扫描间距降至 $60\text{ }\mu\text{m}$ (激光功率为 120 W)时,搭接区形貌熔池波动高度显著增加但熔道宽度显著减小(见图 4g);进一步根据熔道截面可知,LPBF 沉积熔道发生明显下凹且高度与基板持平,表明粉末熔

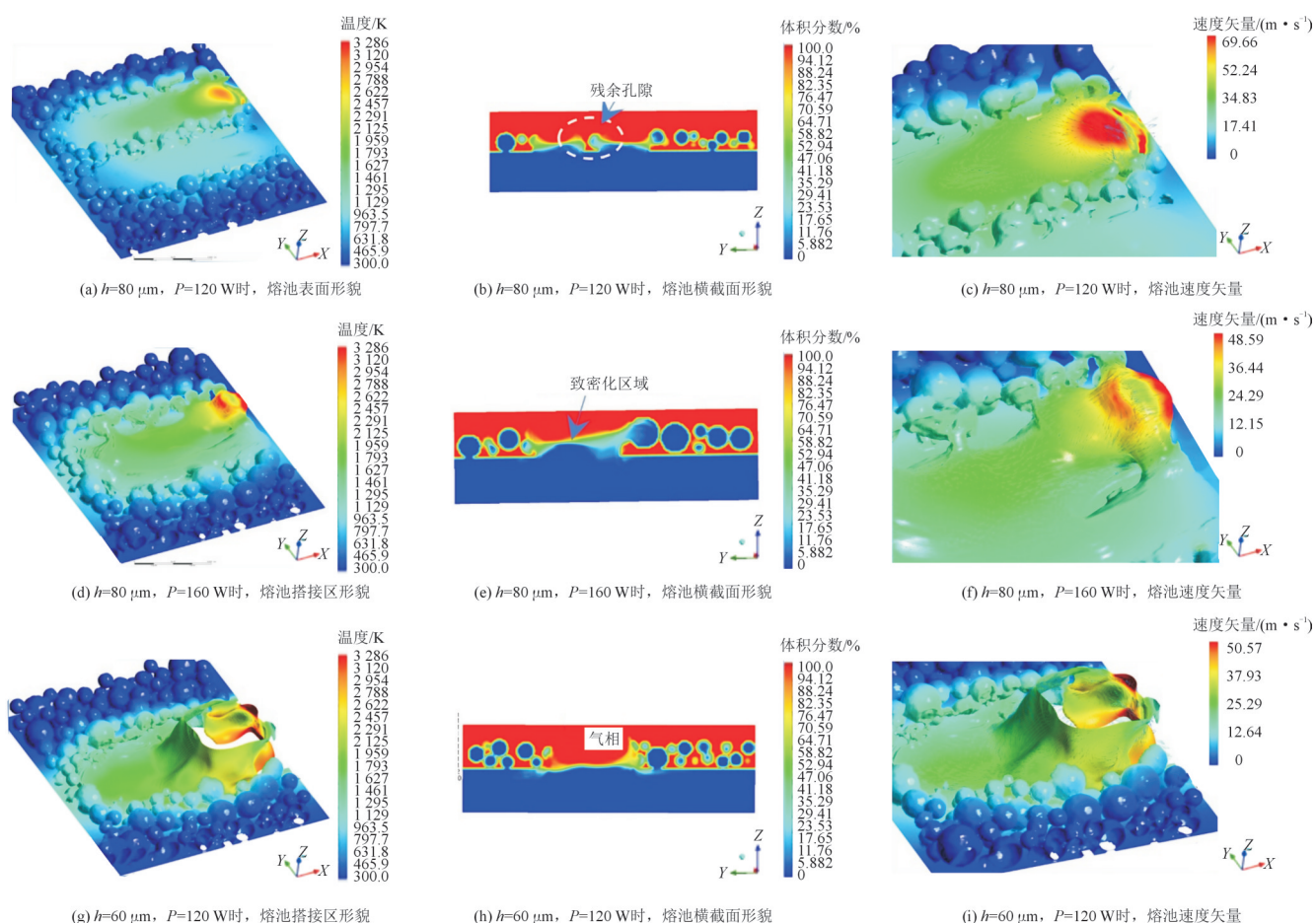


图 4 LPBF 成形 316L 合金表面形貌、熔池速度场和搭接效果(扫描速度 $v=1\text{ }100\text{ mm/s}$)

Fig.4 Surface morphologies, velocity field and overlapping region quality of LPBFed 316L parts

化过程发生了明显的材料气化并以反冲压力形成了熔池自由界面内凹,进而未形成有效沉积(见图 4h);显著增加的熔池最大速度矢量区域表明熔体流动剧烈,较窄的沉积熔道形成的温度梯度有效促进形成了较大流速并加剧了材料气化(见图 4i)。因此,基于仿真熔道搭接质量、熔池横截面和速度流场分布,分析认为在较小光斑下采用 80 μm 的扫描间距可获得有效沉积熔道高度并保证搭接质量。

2.4 激光粉末床熔融 316L 薄壁结构与尺寸精度

图 5 为在优化工艺参数下(光斑直径 $D=30\text{ }\mu\text{m}$,扫描间距 $h=80\text{ }\mu\text{m}$,激光功率 $P=160\text{ W}$,扫描速度 $v=1\text{ }100\text{ mm/s}$,层厚 $l=30\text{ }\mu\text{m}$)激光粉末床熔融 LPBF 成形 316L 薄壁蜂窝结构与尺寸精度。采用 LPBF 工艺成形了直径为 100 mm 和最小壁厚为 100 μm 的薄壁结构

(见图 5a);蜂窝结构由若干薄壁六边形组成(见图 5b),LPBF 直接成形的薄壁结构未发生明显变形,所获得的薄壁结构壁厚约为 105 μm (见图 5c)。进一步对薄壁结构放大表征可以发现,薄壁结构两侧存在轻微的粘粉现象,但壁厚仍致密且均匀(见图 5d),表明通过调整 LPBF 光斑直径和成形工艺参数,可以获得显著小于 150 μm 的壁厚。分析六边形夹角可以发现,相邻薄壁夹角为 119° ,表明薄壁结构夹角可组成稳定的六边形结构(见图 5e);进一步对夹角处薄壁结构作放大表征,可以发现,薄壁结构表面致密且两侧壁面无明显粘粉效应(见图 5f),表明采用小尺寸光斑获得的能量更为集中的光束能更有效熔化 316L 材料并约束单道熔池尺寸,为采用超细光斑 LPBF 直接一体成形壁厚小于 110 μm 的薄壁结构提供了技术途径。

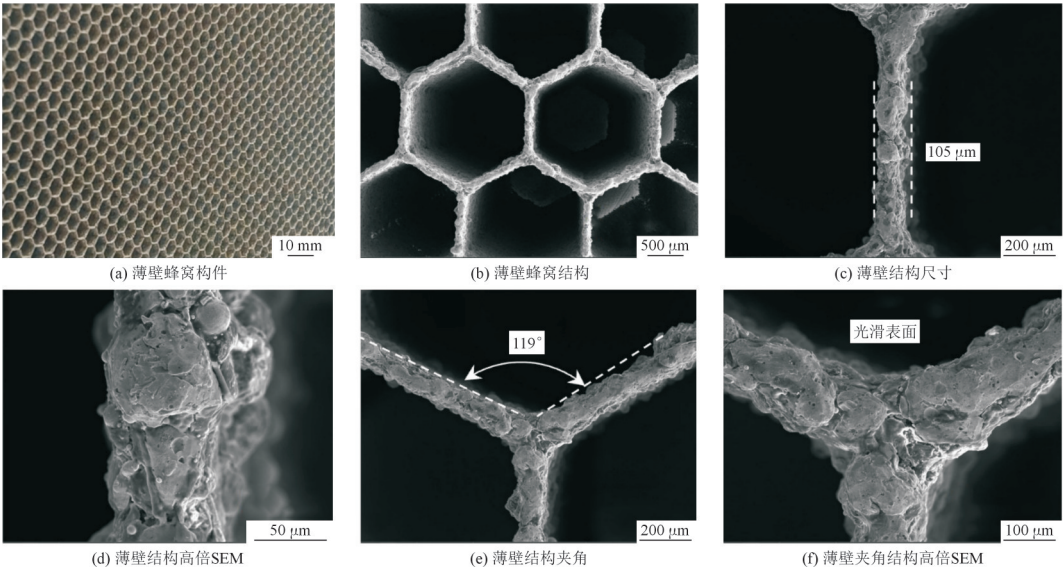


图 5 优化工艺参数下激光粉末床熔融 316L 薄壁结构与薄壁尺寸

Fig.5 Thin-walled structures and dimension of LPBFed 316L parts under optimized process parameters

2.5 激光粉末床熔融 316L 薄壁结构表面质量

图 6 为 LPBF 成形的 316L 薄壁件荧光穿透性缺陷测试的结果。将剪开的薄壁件内表面用荧光液进行喷涂(见图 6a),在涂覆荧光染料后(见图 6b),使用紫外光

源照射试样。荧光染料在紫外光照射下会发出明亮的荧光,显示出其分布情况(见图 6c)。结果表明,LPBF 成形的 316L 薄壁件未发现穿透性缺陷,即从外表面目视检测未发现有荧光液渗透至外表面的现象。内外表面的质量直接影响到薄壁件的性能和应用,而荧光测

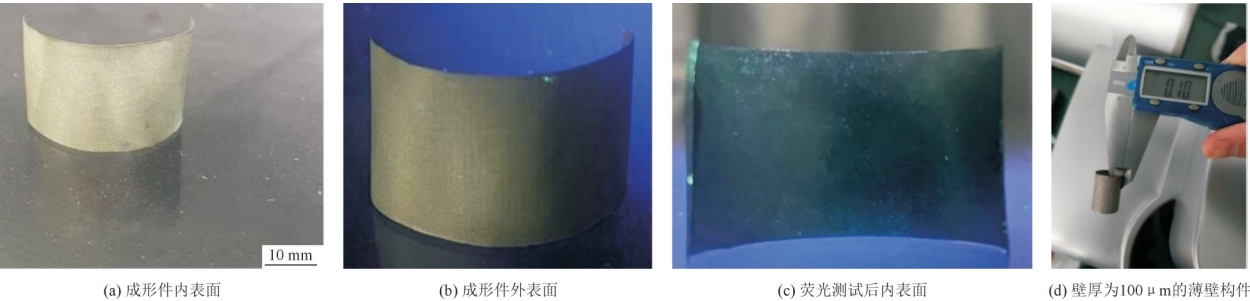


图 6 优化工艺参数下 LPBF 成形 316L 荧光穿透性缺陷测试

Fig.6 Fluorescent penetration defect testing of LPBFed 316L parts under optimized process parameters

试则证明了结构的完整性,表明 LPBF 成形的 100 μm 壁厚的 316L 薄壁件同时实现了轻量化和成形质量的稳定性(见图 6d)。

3 结 论

(1)采用超细激光光斑 30 μm 的 LPBF 工艺,发现过大的扫描间距(100 μm)易形成道间和层间缺陷,而过小的扫描间距(60 μm)易造成材料剧烈气化并形成不规则残余孔隙。当采用优化的扫描间距 80 μm 时,LPBF 成形相邻沉积道有效致密化、熔体表面光滑致密且可有效抑制缺陷。

(2)在优化的工艺参数下(光斑直径 $D=30\ \mu\text{m}$,扫描间距 $h=80\ \mu\text{m}$,激光功率 $P=160\ \text{W}$,扫描速度 $v=1\ 100\ \text{mm/s}$,层厚 $l=30\ \mu\text{m}$),实现了 LPBF 直接稳定成形最小壁厚 105 μm 的薄壁蜂窝结构。

(3)采用超细光斑 LPBF 工艺完成了薄壁结构的一体成形,在成形缺陷和薄壁尺寸调控基础上,需研究超细光斑 LPBF 成形构件显微组织和力学性能的演变规律,建立超细光斑 LPBF 成形工艺-显微组织-力学性能-尺寸精度的映射关系。

参 考 文 献

- BAO Y, WANG B, HE Z X, et al. Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: A review [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(3): 10-26.
- GE Y Q, GONG Y A, HOU M, et al. Optimization design, mechanical properties, and energy absorption characteristics of thin-walled porous structures manufactured by selective laser melting [J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27(1): 2 401 786.
- 张少平, 郭会明, 高彤, 等. 基于先进激光加工技术的下一代航空发动机跨尺度整体式承力薄壁构件设计方法与应用 [J]. 航空学报, 2024, 45(13): 162-174.
- 张洪瑞, 詹梅, 郑泽邦, 等. 航天大型薄壁回转曲面构件成形制造技术的发展与挑战 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 166-185.
- 张瑞, 任军学, 张淑宁, 等. 薄壁结构加工误差预测与控制研究进展 [J]. 航空制造技术, 2024, 67(7): 77-95.
- 林忠钦, 马运五, 夏裕俊, 等. 载运工具高性能薄壁承载结构成形及连接工艺研究进展 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 1-17.
- ZHANG Y M, WU S W, GUO Z X, et al. Defects caused by powder spattering and entrainment in laser powder bed fusion process: High-fidelity modeling of gas, melt pool and powder dynamics [J]. Acta Materialia, 2025, 288: 120 816.
- BU X, LEI Q, ZHANG X K, et al. Effect of process parameters and heat treatment on the microstructure and properties of a Cu-Cr-Si alloy manufactured by laser powder bed fusion [J]. Materials Science and Engineering, 2025, A927: 1-10.
- JIANG M L, YANG Y Q, HAN C J, et al. Defect formation mechanism and suppression strategy in additively manufactured tungsten grid thin-wall structures via laser powder bed fusion [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 120: 222-233.
- LIU Y, ZHANG J, PANG Z C, et al. Investigation into the influence of laser energy input on selective laser melted thin-walled parts by response surface method [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 103: 34-45.
- 彭凯, 蔡高参, 胡彪. 选区激光熔化成形钛合金薄壁件热行为及打印极限高度研究 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31(7): 114-123.
- XIE Y J, YANG H C, WANG X B, et al. Control of wall thickness and surface morphology of tungsten thin wall parts by adjusting selective laser melting parameters [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26: 182-190.
- DING J H, QU S, ZHANG L, et al. Geometric deviation and compensation for thin-walled shell lattice structures fabricated by high precision laser powder bed fusion [J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 1-11.
- ZHANG L, FEIH S, DAYNES S, et al. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading [J]. Additive Manufacturing, 2018, 23: 505-515.
- FU J, LI H, SONG X, et al. Multi-scale defects in powder-based additively manufactured metals and alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 122: 165-199.
- LIU Z Q, GONG H, GAO J Z, et al. Topological design, mechanical responses and mass transport characteristics of high strength-high permeability TPMS-based scaffolds [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 217: 1-18.
- LEE J H, HUSSAIN A, HA J H, et al. Mechanical properties of Ti-6Al-4V thin walls fabricated by laser powder bed fusion [J]. Additive Manufacturing, 2024, 94: 1-13.
- QU S, DING J H, SONG X. Achieving triply periodic minimal surface thin-walled structures by micro laser powder bed fusion process [J]. Micromachines, 2021, 12(6): 705.
- PICHLER P, SIMONDS B J, SOWARDS J W, et al. Measurements of thermophysical properties of solid and liquid NIST SRM 316L stainless steel [J]. Journal of Materials Science, 2020, 55: 4 081-4 093.

(编辑:彭瑾)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

欢迎登陆《特种铸造及有色合金》杂志官方网站投稿、阅读、审稿,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载 pdf 文件,并可体验 AI 导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!