

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.01.004

SLM 成形 AlSi10Mg 倾斜薄壁件 壁厚响应面法优化

姚耀伍^{1,2}, 许明三^{1,2}, 曾寿金^{1,2}, 叶建华^{1,2}, 韦铁平^{1,2}

(1.福建工程学院 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118;
2.福建工程学院 先进制造生产力促进中心,福建 福州 350118)

摘要: 针对激光选区熔化成形倾斜薄壁件尺寸精度低、成形质量差等问题,应用响应曲面法研究工艺参数及倾斜角度对薄壁件壁厚的影响,建立倾斜角度、工艺参数与壁厚相对误差关系模型。结果表明:倾斜角度对壁厚的影响最大,激光功率次之。由于倾斜角度改变,薄壁件悬垂面粉末支撑区域不同,导热效果存在差异,激光功率与扫描间距对于不同倾斜角度的薄壁件壁厚影响不同。其中,激光功率对 45° 倾斜薄壁件壁厚的影响最大,当激光功率选择 150~350 W 时,壁厚相对误差最大差值为 24%;而扫描间距对 90° 倾斜薄壁件壁厚的影响最大,当扫描间距选择 0.1~0.2 mm 时,壁厚相对误差最大差值为 9.5%,合理的工艺参数能够有效降低壁厚相对误差。

关键词: 激光选区熔化;响应面;倾斜薄壁件;壁厚;相对误差

中图分类号: TN249;TG174.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2022)01-0019-08

Wall thickness optimization of laser-melted AlSi10Mg inclined thin-wall parts by response surface method

YAO Yaowu^{1,2}, XU Mingsan^{1,2}, ZENG Shoujin^{1,2}, YE Jianhua^{1,2}, WEI Tieping^{1,2}

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2.Advanced Manufacturing Productivity Promotion Center of FJUT, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to solve the problems of low dimensional accuracy and poor forming quality in laser selective melting forming of inclined thin-walled parts, the influence of process parameters and inclination angle on the wall thickness was studied by response surface method, and the relative error model of inclination angle, process parameters and wall thickness was established. Results show that the inclination angle has the greatest effect on the wall thickness, followed by laser power. Due to the change of inclination angle, the thermal conductivity of thin-walled parts is different due to the different support areas of overhanging end. Laser power and scanning spacing have different effects on the thickness of thin-walled parts with different inclination angles. Laser power has the greatest influence on the wall thickness of parts with a 45° inclination angle. When the laser power is 150 W to 350 W, the maximum relative error of the wall thickness is 24%. The scanning spacing has the greatest influence on the wall thickness of parts with a 90° inclination angle. When the scanning spacing is between 0.1 mm and 0.2 mm, the maximum difference of the wall thickness relative error is 9.5%. Reasonable processing parameters can effectively reduce the wall thickness relative error.

Keywords: selective laser melting; response surface; inclined thin-walled parts; wall thickness; relative error

收稿日期: 2021-10-06

基金项目: 福建省自然科学基金(2020J01872)

第一作者简介: 姚耀伍(1994—),男,安徽淮北人,硕士研究生,研究方向:激光增材制造技术。

通信作者: 许明三(1974—)男,福建仙游人,教授,硕士,研究方向:激光增材制造技术、硬脆材料加工技术、智能制造装备设计。

薄壁件具有质量轻、耗材省和结构紧凑等特点,被广泛用于工业各领域^[1]。其通常采用传统方法制造,铸造、焊接、锻造和冲压等,但是复杂件成形困难,尺寸精度差,需多次加工才能满足实际要求^[2]。激光选区熔化(selective laser melting, SLM)作为增材制造的一种方式,利用高能激光束对沉积的每层粉末熔融并粘结,从而成形任意 3D 模型^[3],可以实现复杂结构轻量化,避免多次加工。

由于铝合金具有密度小、比强度高、导热导电性能好等优点,在工业各领域有着广泛的应用,特别在航天、汽车领域中,散热器、集热器等内部的薄壁翅片、空腔板、弯曲流道结构和封闭腔结构^[4]采用 SLM 成形技术比传统制造具有更大的优势。目前对于 SLM 成形 AlSi10Mg 合金主要研究工艺参数对致密度、表面粗糙度、力学性能等的影响^[5-8]。Zhang 等人^[9]研究了激光选区熔化中不同工艺对组织性能的影响;Sun 等人^[10]研究不同激光工艺参数下 SLM 成形致密化行为,发现适当调整工艺参数可将试样的致密度提高至 99.9%;Brown 等人^[11]通过改变扫描策略,使得薄壁件的尺寸精度有了显著的提升;赵鑫等人^[12]通过优化复杂薄壁件成形设计和工艺,使侧壁尺寸精度误差小于 0.2 mm。由于 AlSi10Mg 合金与其他有色金属、黑色金属相比,存在流动性差、激光反射率高、易氧化等特性,使得 SLM 在成形薄壁件过程中出现尺寸精度低、成形质量差等问题,成形倾斜薄壁相对直立薄壁更加困难。目前广大学者主要研究成形直立薄壁质量,针对 SLM 成形倾斜薄壁件的研究鲜有报道。

本课题以倾斜薄壁件为研究对象,采用灵活性较高、数学建模能力较强的 Box-Behnken 曲面响应法建立工艺参数、倾斜角度与尺寸精度之间的关系模型。通过模型确定每个过程参数对响应值和重要项(主要因素、相互作用因素和二阶因素)的影响,提高倾斜薄壁零件尺寸精度。

1 响应面模型设计

用于描述自变量与因变量之间关系的最常见模型是二次回归模型,如式(1)所示,等式右侧由 3 个总和项构成,第 1 总和项代表主效应,第 2 总和项代表相互作用效应,第 3 总和项代表二次效应,第 4 项代表误差。

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>i}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \tau$$

(1)

式中, Y 表示响应值(因变量), k 表示自变量数, b_0 为常数项, τ 为误差项, b_i 为线性系数, b_{ij} 为相互作用系数, X_i 和 X_j 为无量纲变量的自变量。

二次回归模型具有较强的灵活性,用多项式函数可表达极限状态函数。合理地选取试验点和迭代策略,保证多项式函数能够在失效概率上收敛于真实的隐式极限状态函数^[13]。当真实的极限状态函数非线性程度不大时,线性响应面具有较高的近似精度,因此该模型能够对真实响应面进行良好的估计。

2 实验设备与方法

2.1 实验设备与材料

倾斜薄壁件成形设备为德国生产的 SLM125HL。材料为 AlSi10Mg 合金粉末,其化学成分如表 1 所示;制备方法为真空感应熔炼气雾法,其粒径在 15~53 μm 。成形粉末在 80°下真空烘干 8 h。在工作的过程中,采用氩气进行保护,氧含量控制在 0.05% 以下,从而有效避免成形过程中材料发生氧化。薄壁件随激光扫描轨迹逐层制造,被扫描区域先熔化后固化,未扫描的区域仍保持粉末状态。

表 1 AlSi10Mg 铝合金粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AlSi10Mg powder

元素	质量分数/%
AL	Bal.
Si	9.0~11.0
Mg	0.20~0.45
Fe	≤ 0.55
Zn	≤ 0.10
Mn	≤ 0.45
Ni	≤ 0.05
Cu	≤ 0.05

2.2 试验方案

在 SLM 成形过程中,对成形质量有较大影响的参数达 50 多个,其中能量密度起着关键作用,

它决定熔池和熔道的形状与尺寸,从而影响着整体成形质量。一些学者提出能量输入的数学模型,常见的体能量密度模型表示为:

$$\psi = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

(2)

式中, ψ 表示体能量密度(J/mm²), P 表示激光功率(W), v 表示扫描速度(mm/s), h 表示扫描间距(mm), t 表示铺粉层厚(mm)。因所设计的试验模型均在同一个基板上,每次打印时层厚固定,故铺粉层厚为固定值(0.03 mm)^[14],对 P 、 v 、 h 进行研究。激光扫描方式采用条状网格格式,扫描角度以 67°逐层旋转变换。

根据设备条件和工艺参数的前期研究,确定工艺参数的范围如表 2 所示,通过 Box-Behnken 实验设计,采用二阶试验设计全阶乘建立设计矩阵。

表 2 Box-Behnken 响应曲面法试验设计的

工艺参数因子和水平

Tab.2 Process parameter factors and levels of Box-Behnken response surface method for experimental design

水平	P/W	$v/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	h/mm	$\alpha/(^{\circ})$
1	350	900	0.20	90.0
0	250	750	0.15	67.5
-1	150	600	0.10	45.0

其中倾斜薄壁件的尺寸示意如图 1 所示。为避免倾斜薄壁件在基板上翘曲变形过大,在其底部设计高度为 0.5 mm 的底座。倾斜薄壁零件成形尺寸为长宽均为 8 mm,切片宽度为 0.8 mm。通过三坐标测量仪对倾斜薄壁件四角及中心,进行壁厚的精密测量,测量 3 次取均值为测量均值。测量壁厚可用绝对误差 Δ 和相对误差 ε 来表示。

绝对误差 Δ 是指被测量的实际值 x 与其真值 μ_0 之差,即

$$\Delta = x - \mu_0$$

(3)

相对误差 ε 是指绝对误差的绝对值与真值之比^[15],即

$$\varepsilon = \frac{|\Delta|}{\mu_0} \times 100\%$$

(4)

真值 μ_0 为工艺设定值,测量的实际值 x 为测量均值。当被测量的大小相同时,可用绝对误差

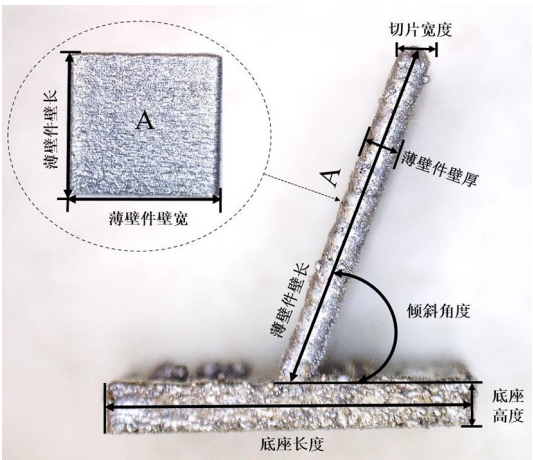


图 1 AlSi10Mg 倾斜薄壁尺寸示意图

Fig.1 Dimensions of AlSi10Mg inclined thin-wall

的大小来比较测量精度的高低。而当被测量的大小不同时,则用相对误差的大小来比较测量精度的高低。本课题中倾斜薄壁件切片厚度相同,成形件由切片堆积而成,切片搭接率不同,从而形成倾斜角度改变,故不同倾斜薄壁件壁厚存在区别,因此相对误差为壁厚尺寸精度高低的评定指标。

3 结果与分析

3.1 试验结果

通过 SLM 在铝基板表面成形 AlSi10Mg 倾斜薄壁件如图 2 所示。Box-Behnken 试验设计方案中每个薄壁件测量结果如表 3 所示。

表 3 Box-Behnken 响应曲面试验方案及结果

Tab.3 Experiment design and results of Box-Behnken response surface methodology

试验序号	P/W	$v/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	h/mm	$\alpha/(^{\circ})$	$\varepsilon/\%$
1	250	900	0.15	45.0	101.43
2	250	750	0.20	90.0	70.07
3	150	900	0.15	67.5	71.08
4	250	600	0.15	90.0	61.76
5	350	750	0.15	90.0	64.17
6	250	900	0.10	67.5	73.07
7	250	750	0.20	45.0	98.19
8	250	900	0.15	90.0	63.01
9	250	750	0.15	67.5	76.21
10	250	750	0.15	67.5	79.45

续表

试验序号	P/W	$v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	h/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\varepsilon/\%$
11	350	750	0.20	67.5	80.97
12	150	750	0.15	90.0	65.91
13	150	750	0.10	67.5	71.55
14	250	600	0.15	45.0	100.47
15	150	750	0.15	45.0	87.42
16	150	750	0.20	67.5	71.84
17	250	750	0.15	67.5	80.13
18	350	900	0.15	67.5	80.85
19	250	600	0.10	67.5	73.58
20	150	600	0.15	67.5	67.35
21	350	600	0.15	67.5	72.86
22	250	750	0.15	67.5	80.39
23	350	750	0.10	67.5	80.26
24	250	750	0.10	90.0	55.42
25	350	750	0.15	45.0	113.66
26	250	750	0.10	45.0	93.34
27	250	600	0.20	67.5	78.07
28	250	900	0.20	67.5	75.93
29	250	750	0.15	67.5	81.24

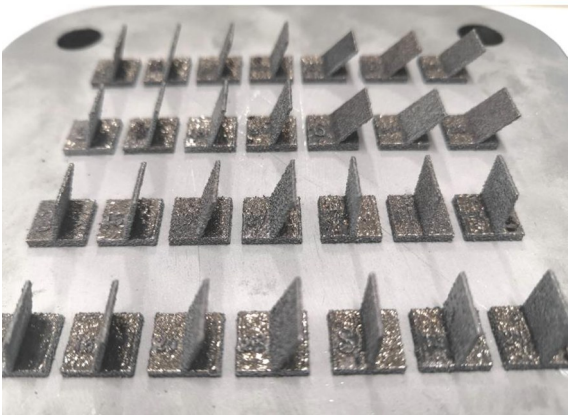


图 2 AlSi10Mg 倾斜薄壁件成形图

Fig.2 Forming diagram of AlSi10Mg inclined thin-wall parts

3.2 响应面模型方差分析

对所获得的试验数据进行多元回归分析,建立所选变量(激光功率 P 、扫描速度 v 、扫描间距 h 和倾斜角度 α) 与响应值(壁厚相对误差 ε) 的数

学模型。

最终通过 Design-expert 软件对试验结果进行对比建模,确定关于相对误差的关系模型如下:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 79.48 + 4.8P + 0.94v + 2.32h - \\ & 17.85\alpha + 1.07Pv + 0.105Ph - 6.99P\alpha - \\ & 0.407\ 5vh + 0.072\ 5v\alpha + 2.45h\alpha - \\ & 1.76P^2 - 2.82v^2 - 2.47h^2 + 4.1\alpha^2 \end{aligned} \quad (5)$$

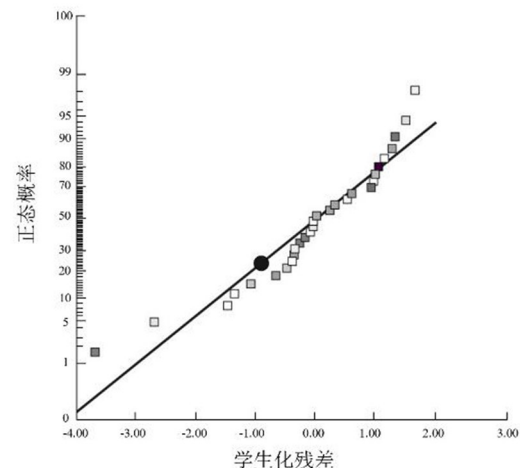
该模型反映各工艺参数对壁厚相对误差的影响程度和正负关系。因各参数采用编码值,其系数的绝对值越大,影响程度越大,系数的正负则反映了参数与响应值的正负关系。式(5)表明在本试验设计方案的各参数范围内,各参数对壁厚相对误差的影响从大到小依次是倾斜角度 α 、激光功率 P 、扫描间距 h 和扫描速度 v 。

当式(5)中各工艺参数采用实际值时,得到的工艺参数实际值与壁厚相对误差的关系模型如下:

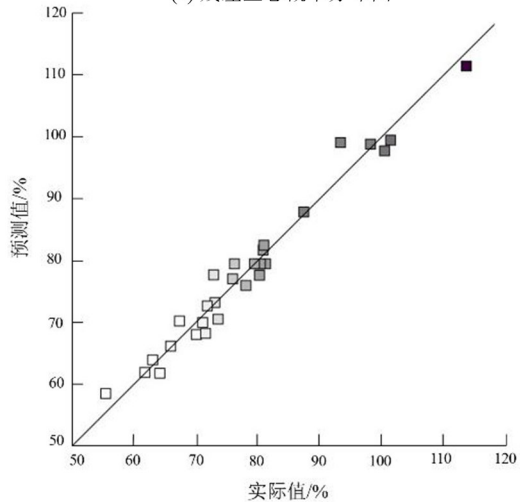
$$\begin{aligned} \varepsilon = & 21.227\ 79 + 0.289\ 608P + 0.183\ 239v + \\ & 230.906\ 67h - 1.45302\alpha + 7.10 \times 10^{-5}Pv + \\ & 0.021Ph - 3.1 \times 10^{-2}P\alpha - 0.054\ 333vh + \\ & 2.1 \times 10^{-5}v\alpha + 2.177\ 78h\alpha - 1.76 \times 10^{-4}P^2 - \\ & 1.25 \times 10^{-4}v^2 - 986.633\ 33h^2 + 8.106 \times 10^{-2}\alpha^2 \end{aligned} \quad (6)$$

与式(5)相比,虽然式(6)的各参数不能直观地反映对壁厚相对误差的影响程度,但是根据实际值计算能够获得较为准确的实际结果,从而获得最佳工艺参数。针对拟合的结果,结合残差分析与数据点的分布能够对壁厚相对误差模型进行直观检测,通过图 3(a)确认残差近似符合正态分布,图 3(b)显示式(6)壁厚相对误差预测值与实际测量值吻合较好,该预测模型能够精确预测 SLM 成形倾斜薄壁件的壁厚相对误差。

基于式(5)与式(6)的响应面二次多项式方差分析如表 4 所示,其中模型 F 值为 30.18,“ P -value”值小于 0.05,表示该模型试验获得的实际值匹配程度较高。决定系数 R^2 值接近于 1,则证明试验结果与预测结果更为接近,随着变量的逐渐增加, R^2 值也随之增加,变量对模型的真实影响也随之改变,因此需要校正决定系数 $\text{Adj } R^2$ 对试验结果进行误差分析。 $\text{Adj } R^2 = 0.935\ 9$ 说明模型与真实值具有高度相关性。决定系数 R^2 与校正决定系数 $\text{Adj } R^2$ 的公式如下:



(a) 残差正态概率分布图



(b) 预测值与实际值分布图

图 3 预测模型分析
Fig.3 Predictive model analysis

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{7}$$

$$\text{Adj}R^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{8}$$

式中, n 为样本量, k 为设计变量数目, y 为样本点响应值, \hat{y}_i 为回归模型得到的响应值, R^2 为决定系数, $\text{Adj}R^2$ 为校正决定系数。

该模型方差分析显示各因子中激光功率 P 、扫描间距 h 和倾斜角度 α 对于厚度模型影响显著程度较高, 扫描速度 v 影响显著程度较小, 交互项 $P\alpha$ 与二阶项 v^2 、 α^2 在模型中也有着显著的影响。

表 4 壁厚的方差分析

Tab.4 Variance analysis for wall thickness

变量来源	离差平方和	自由度	均方	F-value	P-value	评价
模型	4 662.8	14	333.06	30.18	< 0.000 1	显著
P	276.67	1	276.67	25.07	0.000 2	
v	10.6	1	10.60	0.960 9	0.343 6	
h	64.64	1	64.64	5.86	0.029 7	
α	3 822.4	1	3 822.4	346.39	< 0.000 1	
Pv	4.54	1	4.54	0.411 1	0.531 7	
Ph	4.41E - 02	1	4.41E - 02	0.004	0.950 5	
$P\alpha$	195.72	1	195.72	17.74	0.000 9	
vh	0.664 2	1	0.664 2	0.060 2	0.809 8	
$h\alpha$	2.10E - 02	1	2.10E - 02	0.001 9	0.965 8	
$h\alpha$	24.01	1	24.01	2.18	0.162 3	
P^2	20.16	1	20.16	1.83	0.198	
v^2	51.6	1	51.60	4.68	0.048 4	
h^2	39.46	1	39.46	3.58	0.079 5	
α^2	109.22	1	109.22	9.9	0.007 1	
残差	154.49	14	11.03			
失拟项	139.45	10	13.94	3.71	0.109 1	不显著
总和	4 817.28	28				

注: $R^2=0.967\ 9$, $\text{Adj}R^2=0.935\ 9$, $\text{Pred}R^2=0.828\ 4$, 精密度为 22.170 2。

3.3 响应面分析及优化

图 4 为设计空间中心点上所有因素对响应值影响的扰动图。从图 4 可知, 随着激光功率的增加, 薄壁件壁厚相对误差逐渐增大。过高的激光功率导致更多的能量被金属粉末吸收, 从而产生较大的熔池和较宽的熔道。相对于其他两个因素, 扫描速度和扫描间距变化趋势比较平缓, 对壁厚的相对误差影响较小。随着扫描速度和扫描间距的增大, 薄壁件吸收的能量越低, 熔池边缘部分粉末未充分熔化, 致使表面存在粘粉以及内部工艺孔的产生, 壁厚相对误差有稍微增大趋势。45.0°倾斜薄壁件的壁厚约为 353.55 μm, 直径为 50 μm 粉末吸附在薄壁件的两侧, 假设粉末颗粒一半嵌入薄壁件内, 其壁厚增加 14.14%, 因此粘粉对壁厚存在一定的影响。在实际成形过程中,

除表面粘粉外,倾斜薄壁件与直立薄壁件最大的区别在于前者存在上表面与下表面,其下表面的粗糙度远大于上表面的粗糙度,而挂渣是造成粗糙度较大的主要原因,其中挂渣、粘粉如图 5 所示。对于同一倾斜角度的薄壁件而言,扫描速度和扫描间距越大,能量密度越小,熔池流动性越差,未熔化的粉末越多,挂渣越严重,表面粗糙度增大,倾斜薄壁件的壁厚随之增加,故相对误差越大。

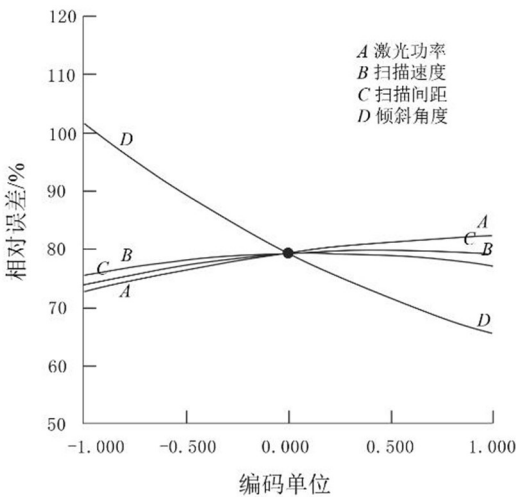


图 4 各因素对壁厚相对误差扰动图
Fig.4 Relative error perturbation diagram of various factors on wall thickness

由图 4 可知倾斜角度与其他工艺参数相比,对壁厚影响最大。随着倾斜角度的减小,壁厚的相对误差增大。在成形过程中,倾斜薄壁件下表面悬垂于金属粉末之上,倾斜角度越小,粉末支撑区域越广,而粉末支撑区域的热导率只有相应成形实体材料的 1/100,热传导效果差,激光扫描区域热量聚集,下层粉末中的热量未及时扩散,熔池的范围扩大,致使整体壁厚的相对误差增加。因此在合理的工艺参数范围内,适当增加能量密度能够提高薄壁件的成形质量,从而避免成形过程中工艺孔及挂渣产生,最终减小倾斜薄壁的相对误差。

图 6 为各因素对壁厚相对误差的响应曲面图,用于评价任意两个因素对壁厚相对误差的交互影响。A 为激光功率,B 为扫描速度,C 为扫描间距,D 为倾斜角度。图 6(a)、(b)、(d) 的表面平缓,可见其交互作用对壁厚的相对误差影响较小。从图 6 (c) 可知,激光功率对不同倾斜角度的薄

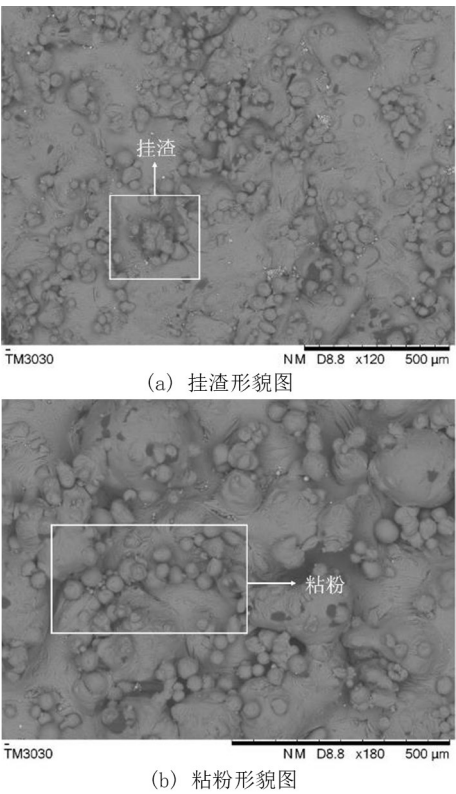


图 5 样件表面 SEM 图
Fig.5 SEM image of sample surface

壁件壁厚相对误差影响不同,倾斜角度越小影响越大。对于 45°薄壁件而言,随着激光功率增大,壁厚的相对误差随之增大,最高点与最低点之间差值为 24%;而对 90°的薄壁件而言,激光功率的改变,壁厚的相对误差几乎未发生变化。因此通过改变激光功率能够有效降低倾斜角度较小的薄壁件壁厚相对误差。图 6 (e) 表示薄壁件壁厚的相对误差随着倾斜角度的增大而增大,而扫描速度影响较小。图 6(f) 为倾斜角度与扫描间距的交互影响。与倾斜角度越小的薄壁件相比,扫描间距对倾斜角度越大的薄壁件影响更大,当扫描间距选择 0.1 mm 时,90°薄壁件相对误差最小,最高点与最低点差值为 9.5%。综上所述,45.0°~67.5°倾斜薄壁件最佳工艺参数为激光功率 150~200 W、扫描速度 1 000~1 500 mm/s、扫描间距 0.05~0.08 mm;67.5°~90°倾斜薄壁件最佳工艺参数为激光功率 350~400 W、扫描速度 1 000~1 500 mm/s、扫描间距选择 0.10~0.12 mm。

经上述 Box-Behnken 响应曲面法对倾斜薄壁件壁厚的相对误差进行优化后,得到 45.0°、67.5°、90.0°薄壁件最优工艺参数如表 5 所示。通

过对比优化预测值和优化试验结果可知,45.0°、67.5°、90.0°薄壁件壁厚相对误差预测值与实际值之间的预测误差值(实际值、预测值之差与实际值之比)依次为 52.63%、25.64%、17.22%。

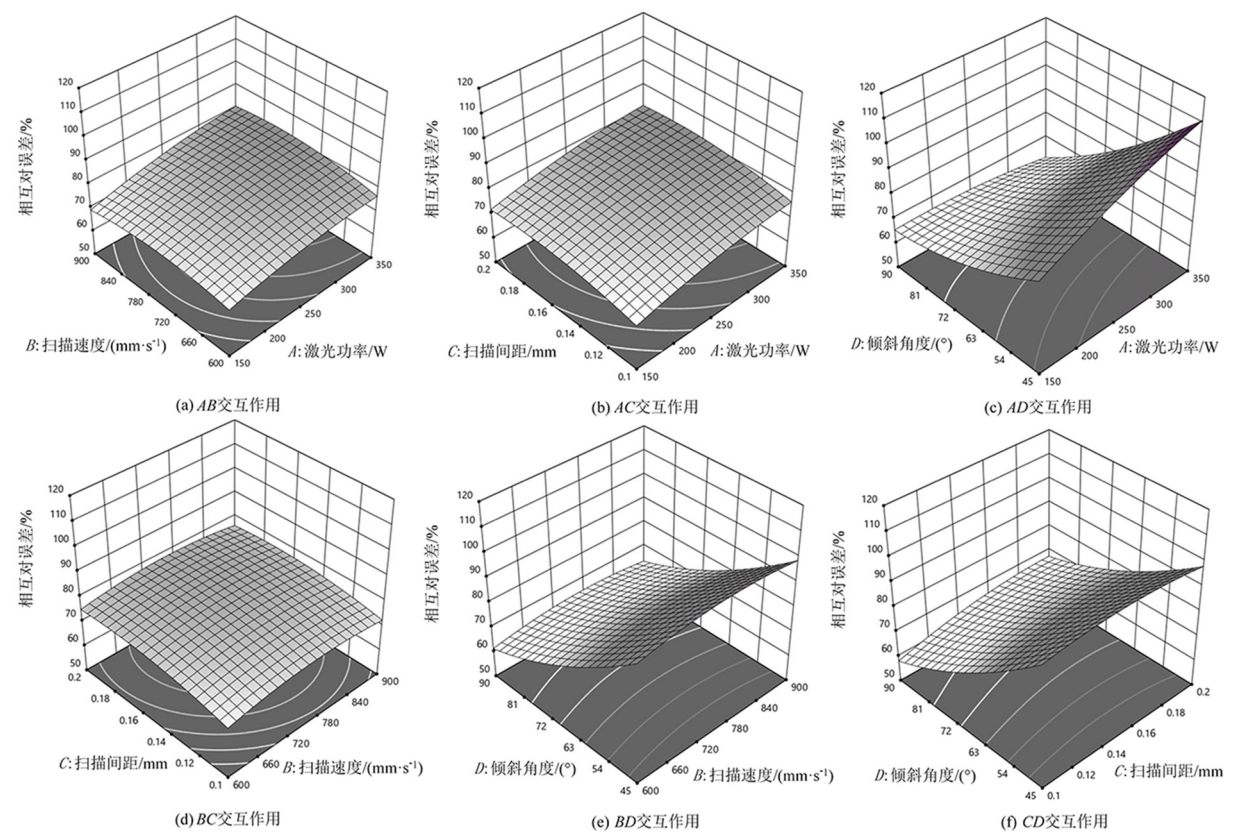


图 6 SLM 成形参数因子对壁厚相对误差交互作用响应曲面

Fig.6 Response surface of interaction between SLM forming parameter factors and relative error of wall thickness

表 5 响应面预测值与实际值

Tab.5 Predicted and actual values of response surface					
$P /$ W	$v /$ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$h /$ mm	$\alpha /$ ($^{\circ}$)	预测值 $\varepsilon / \%$	实际值 $\varepsilon / \%$
150.00	1 500.000	0.050	45.0	11.057	23.34
214.97	1 490.459	0.109	67.5	9.807	13.18
336.66	1 446.212	0.094	90.0	4.354	5.26

选取优化前试验结果与优化后的结果进行对比。45.0°薄壁件壁厚相对误差工艺优化前最低值为 15 号样件 87.42%,经优化后降低至23.34%; 67.5°薄壁件壁厚相对误差工艺优化前最低值为 20 号样件 67.35%,经优化后降低至 13.18%; 90.0°薄壁件壁厚相对误差工艺优化前最低值为 24 号样件 55.42%,经优化后降低至 5.26%。总体说明优化后倾斜薄壁件壁厚的相对误差降低显著,此工艺参数能够有效提升 SLM 成形 AlSi10Mg

倾斜薄壁件的尺寸精度。

4 结论

- 1) SLM 成形倾斜薄壁件,其壁厚的相对误差与倾斜角度和工艺参数的选择有关。影响程度从大到小依次为:倾斜角度、激光功率、扫描间距、扫描速度。
- 2) 倾斜薄壁件的倾斜角度不同,工艺参数的影响也不同。对于 45.0°~67.5°的倾斜薄壁件,激光功率影响最大;对于 67.5°~90.0°的倾斜薄壁件,扫描间距的影响更大。
- 3) 通过试验与分析获得最佳的工艺区间,45.0°~67.5°倾斜薄壁件最佳工艺区间为激光功率 150~200 W、扫描速度 1 000~1 500 mm/s、扫描间距 0.05~0.08 mm;67.5°~90.0°倾斜薄壁件的最佳工艺区间为激光功率 350~400 W、扫描速度 1 000~1 500 mm/s、扫描间距 0.10~0.12 mm。

参考文献:

- [1] BOEGELEIN T, LOUVIS E, DAWSON K, et al. Characterisation of a complex thin walled structure fabricated by selective laser melting using a ferritic oxide dispersion strengthened steel[J]. *Materials Characterization*. 2016, 112: 30–40.
- [2] XU Y, MA Y, ZHANG S, et al. Numerical and experimental study on large deformation of thin-walled tube through hydro-forming process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, 87(5/6/78): 1885–1890.
- [3] MIRANDA G, FARIA S, BARTOLOMEU F, et al. A study on the production of thin-walled Ti6Al4V parts by selective laser melting[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 39: 346–355.
- [4] 刘正武, 时云, 王毅, 等. 激光选区熔化制备超薄铝合金板的可行性及力学性能[J]. *机械工程材料*, 2020, 44(11): 97–101.
- [5] READ N, WANG W, ESSA K, et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development[J]. *Materials & Design (1980–2015)*, 2015, 65: 417–424.
- [6] 邹亚桐, 魏正英, 杜军, 等. AlSi10Mg 激光选区熔化成形工艺参数对致密度的影响与优化[J]. *应用激光*, 2016, 36(6): 656–662.
- [7] 张文奇, 朱海红, 胡志恒, 等. AlSi10Mg 的激光选区熔化成形研究[J]. *金属学报*, 2017, 53(8): 918–926.
- [8] GU D D, MEINERS W, WISSENBAACH K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms[J]. *International Materials Reviews*, 2012, 57(3): 133–164.
- [9] ZHANG J L, SONG B, WEI Q S, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(2): 270–284.
- [10] 孙兵兵, 房立家, 张学军. 激光选区熔化 AlSi10Mg 工艺优化及显微组织研究[J]. *焊接技术*, 2020, 49(2): 5–8, 113.
- [11] BROWN B, EVERHART W, DINARDO J. Characterization of bulk to thin wall mechanical response transition in powder bed AM[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22(5): 801–809.
- [12] 赵鑫, 虞雨涯, 吴圣川, 等. 新型飞机用铝合金薄壁件的选区激光熔化成形研究[J]. *电焊机*, 2021, 51(3): 1–7, 111.
- [13] 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.
- [14] 史振伟, 王敏杰, 戚文军, 等. 激光选区熔化 3D 打印 AlSi10Mg 合金的铺粉厚度研究[J]. *中国机械工程*, 2021: 1–9.
- [15] 邢闽芳, 房强汉, 兰利洁. 互换性与技术测量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 76.

(责任编辑: 方素华)