

选区激光熔化成形 NiTi 合金工艺参数 对表面粗糙度的影响规律

王俊伟, 贺定勇, 吴旭*, 王国红

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘要: **目的** 针对选区激光熔化 (SLM) 制备 NiTi 形状记忆合金表面粗糙度难以满足实际应用要求, 通过优化工艺参数 (激光功率、扫描速度、扫描间距) 以有效地降低表面粗糙度以及研究各工艺参数对表面粗糙度的影响规律。**方法** 采用 L_{16} 正交阵列的田口模型设计选区激光熔化制备 NiTi 样品的工艺参数, 通过对表面粗糙度信噪比值进行统计方法分析以及样品表面形貌的表征, 研究不同工艺参数对表面粗糙度的影响程度以及影响机理, 最终优化出制备低表面粗糙度的工艺参数组合。**结果** 在激光功率为 20 W 和 30 W 时, NiTi 粉末不能够充分熔化造成熔道不连续, 使得样品表面起伏增大, 粗糙度值最大到 7.8 μm ; 增大激光功率到 40 W 和 50 W 时, 粉末充分熔化, 样品表面形貌明显改善; 在相同功率下, 扫描速度从 200 mm/s 增加到 500 mm/s 时, 样品的粗糙度值也随之增大。**结论** 工艺参数对表面粗糙度影响的重要性顺序依次为激光功率、扫描速度、扫描间距; 最终优化出的工艺参数组合为激光功率 50 W、扫描速度 200 mm/s、扫描间距 0.07 mm, 并在该工艺参数下制备的样品表面粗糙度值为 1.38 μm , 与模型预测的值 1.43 μm 接近, 相差仅为 9.97%。

关键词: 选区激光熔化; NiTi 形状记忆合金; 田口方法; 表面粗糙度; 工艺优化

中图分类号: V261.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)09-0200-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.09.019

Effect of Process Parameters on Surface Roughness of NiTi Alloys Produced by Selected Laser Melting

WANG Junwei, HE Dingyong, WU Xu*, WANG Guohong

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

ABSTRACT: Since the surface quality of the NiTi parts prepared by selected laser melting (SLM) technology is generally difficult to meet the requirements of the application due to the high surface roughness, the work aims to investigate the effects of laser power, scanning speed and hatch space on the surface roughness of NiTi alloy samples during the process of SLM NiTi parts.

The pre-alloy NiTi powders were atomized by the electrode induction melting gas atomization technique (ALD, Germany) under the protection by argon gas. NiTi powders were observed by scanning electron microscopy (SEM). The particle size distribution (PSD) was measured by laser scattering particle size analyzer (HORIBA LA-960S, Japan). For experimental design, the model was created based on the Taguchi design model of the L_{16} orthogonal array. The range of laser power, scanning speed

收稿日期: 2023-04-10; 修订日期: 2023-10-16

Received: 2023-04-10; Revised: 2023-10-16

引文格式: 王俊伟, 贺定勇, 吴旭, 等. 选区激光熔化成形 NiTi 合金工艺参数对表面粗糙度的影响规律[J]. 表面技术, 2024, 53(9): 200-208.

WANG Junwei, HE Dingyong, WU Xu, et al. Effect of Process Parameters on Surface Roughness of NiTi Alloys Produced by Selected Laser Melting[J]. Surface Technology, 2024, 53(9): 200-208.

*通信作者 (Corresponding author)

and hatch spacing was 20-50 W, 200-500 mm/s and 0.05-0.08 μm . The scanning strategy of laser rotation 67° between two consecutive layers was applied to produce NiTi parts, with a fixed layer thickness of 30 μm . NiTi samples of 6 mm \times 6 mm \times 6 mm were produced by SLM technology (EOS M100, Germany). The surface roughness value and surface morphology were measured by laser confocal microscope (Olympus LEXT OSLS4100, Japan). The surface roughness signal-to-noise (S/N) ratio was calculated by the equation. The S/N ratio was a logarithmic function used as an objective function for optimization, which was conducive to data analysis and prediction of optimal results.

Samples are successfully prepared by SLM technology. The results showed that, at the laser power of 20 W and 30 W, the sample surface had high fluctuation due to the powder, which could not melt sufficiently to the unstable melt track during the process of SLM NiTi parts, with a maximum surface roughness value of 7.8 μm . When the value of laser power reached 50 W, the sample with low surface roughness value was obtained which was attributed to the stable melt track, with a minimum surface roughness value of 1.3 μm . The sample surface roughness value increased with the increase of scanning speed, at the same laser power, which was attributed to the time of NiTi powder melting increasing at low scanning speed. The decreasing of hatch spacing could remelt the adjacent laser track to improve the surface morphology of NiTi parts. However, the surface roughness affected was not obvious when the laser track was not unstable.

The rank order of the process parameters on the surface roughness is laser power, scanning speed, hatching spacing after statistical methods are used to analyze the surface roughness signal-to-noise ratio. According to the mathematical model, the optimal combination of process parameters is laser power of 50 W, scanning speed of 200 mm/s and hatch space of 0.07 mm. The surface roughness value (1.38 μm) of the sample prepared by the final optimized process parameters combination is close to the predicted value (1.43 μm) by fitting equation. The difference of the surface roughness value is only 9.97%. The model provides an accurate guide for experiments for the study of SLM NiTi parts.

KEY WORDS: selective laser melting; NiTi shape memory alloy; Taguchi method; surface roughness; process optimization

近年来,随着材料加工技术的不断发展,形状记忆合金在医疗领域应用越来越广泛^[1-2]。NiTi 形状记忆合金由于具有优异的超弹性、形状记忆效应、抗疲劳、低弹性模量和生物相容性等独特特性,成为目前商业化应用最广泛的形状记忆合金,其也被视为具有前景的智能材料之一^[3-6]。但是,随着实际应用对零件结构的要求越来越高,而 NiTi 合金的加工性差,在制备过程中刀具磨损大,用传统的加工方式难以制备出复杂几何形状的零件,限制了进一步拓展 NiTi 形状记忆合金的应用^[7-10]。随着增材制造技术的快速发展,一种基于 CAD 模型数据,以激光作为能量源作用于连续铺粉层的选区激光熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM),可以直接制备出复杂零件,有效避免了传统加工 NiTi 合金所遇到的困难^[11-12]。目前,由于选区激光熔化技术具有材料利用率高、工艺周期短等优点,逐渐发展成为制备 NiTi 合金零件最常用的一种增材制造技术^[13]。在选区激光熔化技术制备零件过程中,熔池和粉末流动规律比较复杂,成形件的表面粗糙度难以控制。然而 NiTi 在工业以及生物医学领域应用(如骨骼植入物等)对表面粗糙度有严格的要求,如果不能有效控制表面粗糙度,就会限制选区激光熔化技术制备 NiTi 合金部件的应用。因此,研究选区激光熔化的工艺参数对成形件表面粗糙度的影响规律,提高 NiTi 合金成形件的表面质量是一项十分具有意义的工作。

为满足工业应用对表面粗糙度的要求,关于增材制造零件表面粗糙度与工艺参数的关系,国内外学者进行了大量研究。Calignano 等^[14]研究了直接金属激光烧结工艺参数对铝合金表面粗糙度的影响规律,发现扫描速度对表面粗糙度的影响最大,通过优化工艺参数,表面粗糙度可以降低 25%。黄卫东等^[15]研究了选区激光熔化工艺参数与 316L 成形样表面粗糙度的关系,发现激光功率和扫描速度对表面粗糙度的影响最大。Wang 等^[16]对线能量密度(LED)和 AISi10Mg 样品表面粗糙度之间的联系进行了研究,发现增加 LED,表面粗糙度降低。然而,过大的 LED 导致熔池不稳定反而会降低表面质量,同时会形成缺陷。Carter 等^[17]对 Ti-6Al-4V 粉末熔融过程中的工艺参数与表面粗糙度之间的联系进行了研究,发现零件表面粗糙度随着扫描速度的增加而减小,而激光功率变化对表面粗糙度的影响较小。这些研究充分证明选区激光熔化工艺参数对制备出样品的表面粗糙度具有明显影响,工艺参数与样品表面粗糙度之间存在着深刻的内在联系。

然而,现有关于选区激光熔化 NiTi 合金的研究主要集中在 SLM 工艺参数与制备样品的微观组织、压缩性能、相转变温度、循环稳定性等性能^[18-20]。对于选区激光熔化工艺参数与制备 NiTi 形状记忆合金样品的表面粗糙度之间的关系没有详细的研究,忽略了表面粗糙度对选区激光熔化制备 NiTi 合金零件的

重要性,这将会制约 NiTi 合金的进一步应用。本研究选取 NiTi 形状记忆合金,使用田口方法设计试验,研究 SLM 工艺参数(激光功率、扫描速度和扫描间距)与 NiTi 成形件表面粗糙度之间的内在联系,探讨通过拟合模型和统计手段预测成形件表面粗糙度的方法。

1 试验

1.1 设备及材料

试验使用的近等原子比 NiTi 合金粉末由电极感应熔炼气体雾化(EIGA)技术,在高纯氩气保护下制备而成。粉末形貌如图 1a 所示,从图中可以看出 NiTi 合金粉末的形状主要为球形和近球形,只有少量

的卫星球。采用激光粒度分析仪测试 NiTi 粉末的粒度分布,结果如图 1b 所示。NiTi 粉末的粒径范围为 15~90 μm ,基本没有粒径小于 10 μm 的粉末,这就保证粉末具有良好的流动性,粒径范围为 15~60 μm 的粉末个数占比超过 95%,粉末平均粒径(D_{50})为 36 μm 。

SLM 的工作原理如图 2a 所示,本文使用由德国 EOS 公司生产的型号为 M100 选区激光熔化打印机,在高纯氩气氛围保护下,制备出与水平方向垂直的立方体(6 mm×6 mm×6 mm)成形样,制备过程和最终制备出的成形样如图 2b、c 所示。使用 OLS4100 3D 激光显微镜对成形样的表面形貌及粗糙度(S_a)进行观测。采用日立 S-3400N 扫描电子显微镜(SEM),对粉末形貌进行观察,电压为 15 kV。

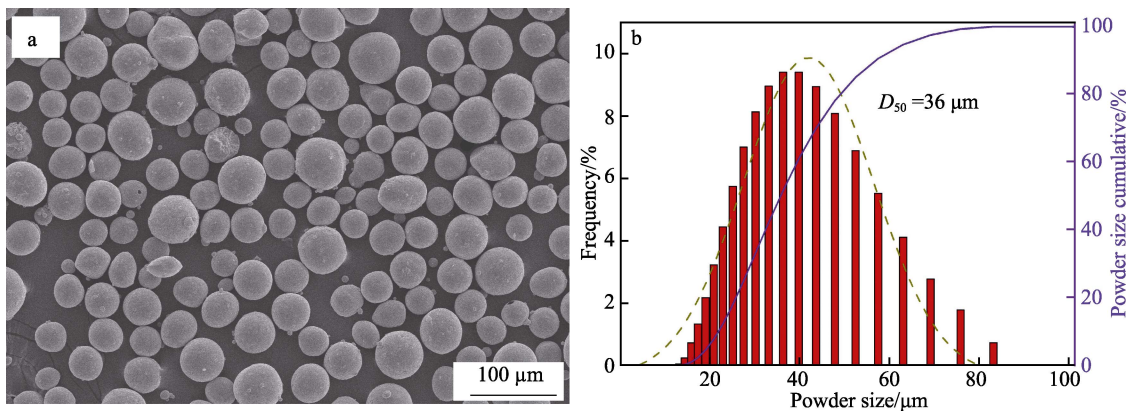


图 1 NiTi 合金粉末 SEM 形貌 (a) 和粉末粒度分布 (b)
Fig.1 SEM morphology (a) and size distribution (b) of the NiTi alloy powder

1.2 方法

在选区激光熔化制备 NiTi 样品过程中,考虑激光功率(LP)、扫描速度(SS)和扫描间距(HS)3个变量对成形件表面粗糙度的影响,将其他参数设置为固定值:铺粉厚度为 30 μm ,离焦量为 0 mm,各参数具体取值如表 1 所示。采用 L_{16} 田口方法进行试验方案设计。采用三因素四水平田口试验方法,分别对激光功率、扫描速度和扫描间距选取 4 个水平值(见表 1)。如果按照传统全因素试验方法,需要 4^3 组试验,田口方法将试验量减少到了 16 组,大大减少了正交试验量^[21]。信噪比(Signal-to-Noise Ratio, $R_{S/N}$)作为优化目标函数的对数函数,有助于数据分析和预测最佳结果, $R_{S/N}$ 值是由公式(1)或者公式(2)计算^[22]。

$$\eta_L = -10 \lg \left(\frac{\sum \frac{1}{y_i^2}}{n} \right) \quad (1)$$

$$\eta_S = -10 \lg \left(\frac{\sum y_i^2}{n} \right) \quad (2)$$

式中: η_L (或 η_S)表示根据试验结果计算出的信噪比值, y_i 表示第*i*组试验的结果值, n 表示重复次数。公式(1)是当期望值大时即响应最大化时使用,公式(2)用于期望值小即响应最小化时。根据不同工艺参数组合下制备样品表面粗糙度信噪比值的差异,通过使用方差分析来评估得出结论相关的统计置信度。

表 1 田口试验设计工艺参数窗口
Tab.1 Process parameters window used in Taguchi method

Parameters	Values
LP/W	20, 30, 40, 50
SS/(mm·s ⁻¹)	200, 300, 400, 500
HS/mm	0.05, 0.06, 0.07, 0.08
Layer thickness/ μm	30
Spot size/ μm	40

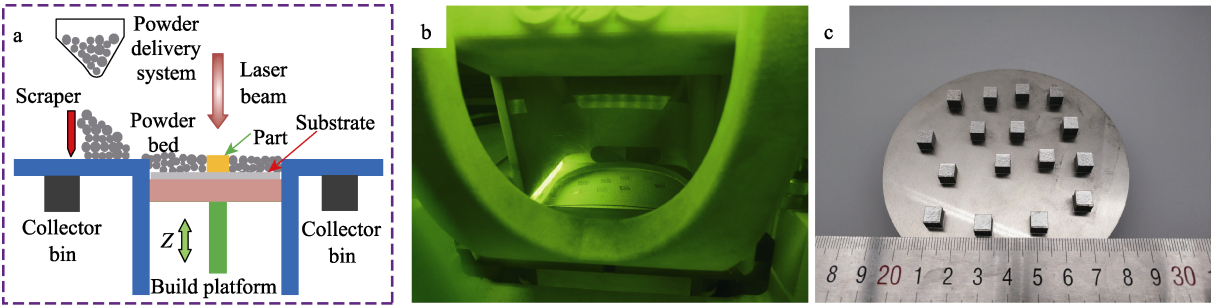


图 2 SLM 原理示意图 (a)、SLM 过程 (b) 与成形样品 (c)
Fig.2 Schematic diagram of the SLM system work principle (a), SLM process (b) and finished samples (c)

2 结果与分析

2.1 表面粗糙度信噪比值

为了观察 SLM 制备样品表面的宏观形貌,使用体视显微镜对其进行观察。从图 3 中可以看出,在激光功率为 20 W 和 30 W 时 (1~8 号样品),样品表面由于粉末熔化不充分,表面起伏较大,随着激光功率

的增加 (热输入的增大),样品表面逐渐变得平整,但是继续增加激光功率 (13~16 号样品),由于样品表面中心区域过度重熔,而边缘区域重熔次数不足导致样品表面边缘出现凸起。使用激光共聚焦进一步观察在不同 SLM 工艺参数组合下制备 NiTi 样品表面三维形貌,样品的表面三维形貌如图 4 所示,从图中可以看出,随着工艺参数的改变,表面平整度有明显的

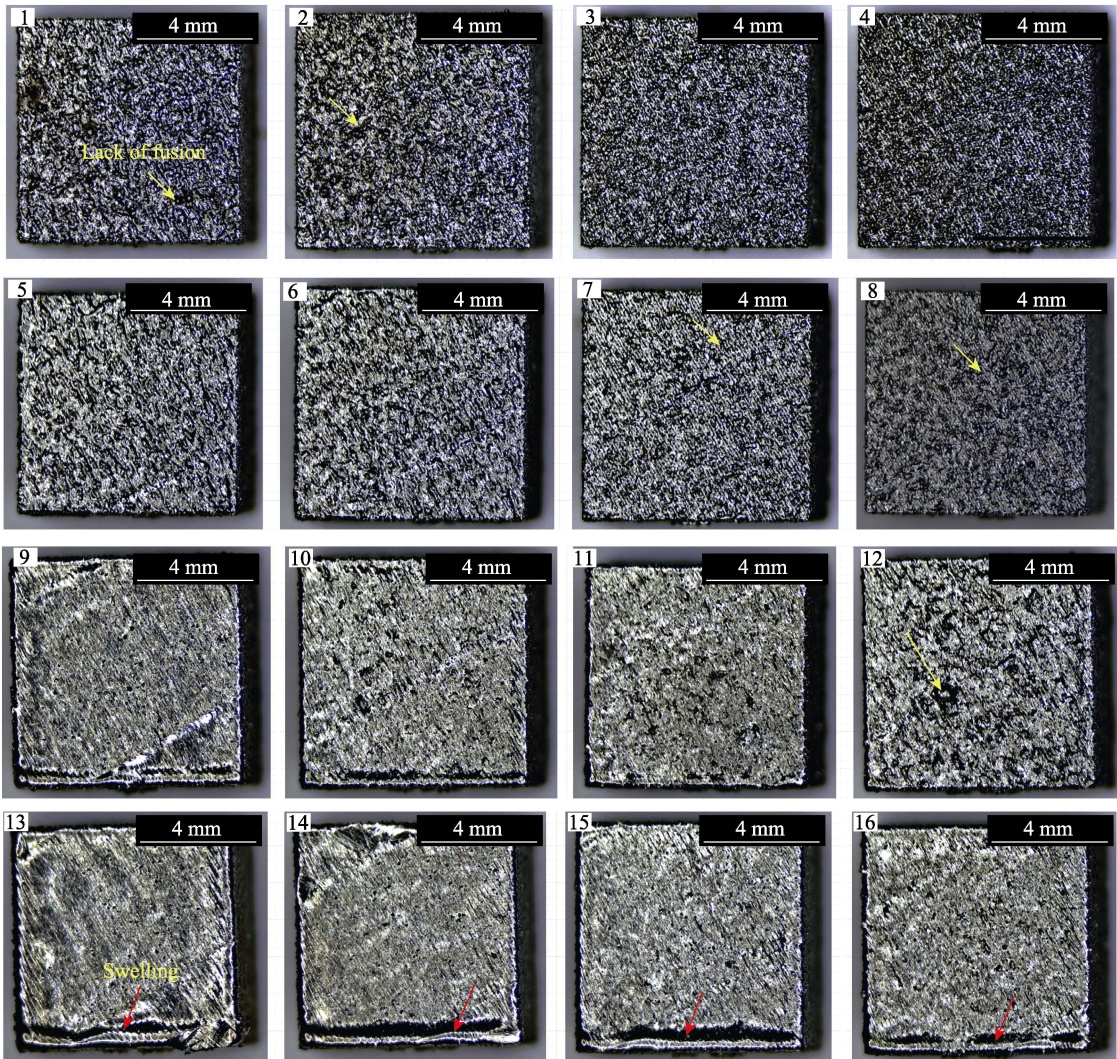


图 3 田口试验成形件表面形貌
Fig.3 Surface morphology of Taguchi test molded parts

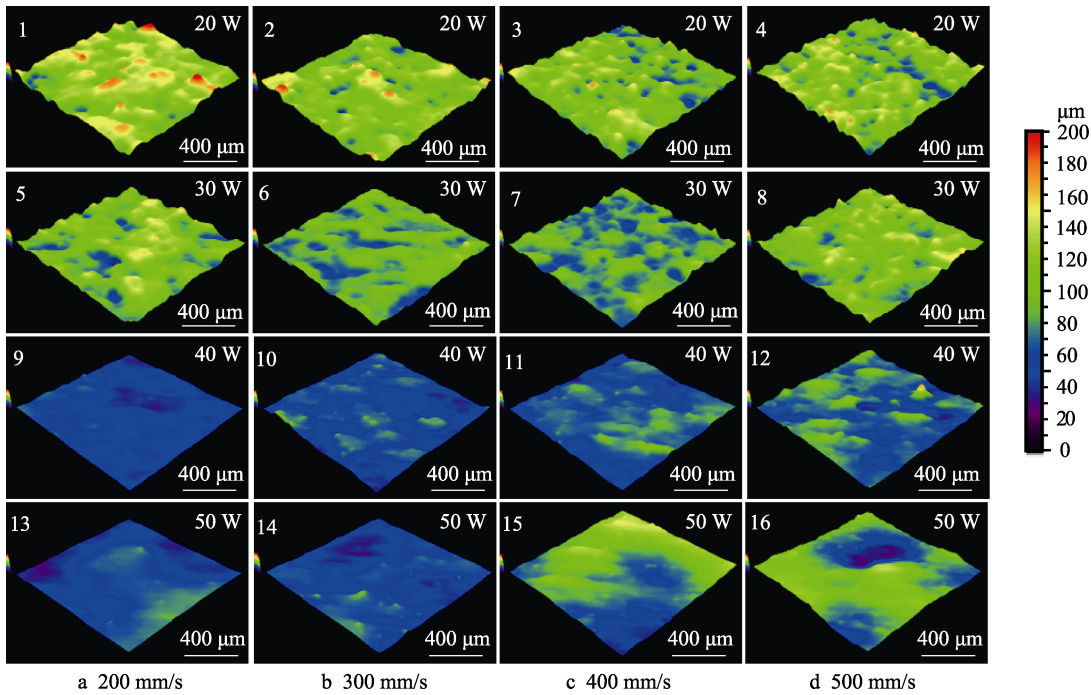


图 4 田口试验成形件表面形貌
Fig.4 Surface morphology of Taguchi test molded parts

变化,尤其当激光功率增大时,样品表面的高低起伏明显减小,降低扫描速度后,表面平整度也有一定的改善,这说明激光功率和扫描速度对样品的表面形貌有一定的影响。综合图 3 和图 4 发现,在激光功率为 20 W 和 30 W 时,样品表面缺陷多,起伏大,增大激光功率到 40 W 和 50 W 时,样品表面缺陷明显减少,起伏变小,而能量密度过大也会导致样品边缘出现凸起。因此在优化工艺参数过程中,既要保证样品表面粗糙度小,又要减少边缘的凸起。

本文以 SLM 制备的 NiTi 合金样品表面粗糙度尽量小为目标进行研究,故 $R_{S/N}$ 值用公式 (2) 计算,具体值如表 2 所示。表 2 中也列出了田口方法的 L_{16} 正交阵列设计的具体试验方案对应的各参数值。

使用激光共聚焦显微镜测量出由不同工艺参数组合下 SLM 制备 NiTi 样品表面粗糙度值 (S_a),具体数值如表 2 所示。从表中可以看出,不同工艺参数组合制备样品的 S_a 有明显的差异,这也与观察到的表面宏观形貌情况一致(图 3、图 4),在激光功率为 20 W 和 30 W 时 S_a 值比较大, S_a 值最大可达 7.80 μm (样品 4),增大激光功率到 40 W 和 50 W 时 S_a 明显降低,调整工艺参数后 S_a 值最小为 1.34 μm (样品 13),这说明 SLM 工艺参数的变化可以显著影响 NiTi 合金样品表面粗糙度,二者有着密切的内在关联。为了评价工艺参数对表面粗糙度的影响程度,选用信噪比值作为评价指标,具体信噪比值使用公式 (2) 计算,计算结果再采用统计学的相关理论去分析^[23]。信噪比值越大,说明工艺参数的优化系统越稳定,预测出的结果与实际越接近^[24]。样品表面粗糙度信噪比值的计算结果如表 2 所示。

表 2 田口试验设计工艺参数组合、试验结果及信噪比值
Tab.2 Combination of process parameters, test results and S/N ratio of Taguchi test design

Samples number	Laser power/W	Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Hatch space/mm	$S_a/\mu\text{m}$	$R_{S/N}/\text{dB}$
1	20	200	0.05	6.27	-15.95
2	20	300	0.06	6.38	-16.10
3	20	400	0.07	7.24	-17.19
4	20	500	0.08	7.80	-17.84
5	30	200	0.06	5.56	-14.9
6	30	300	0.05	5.38	-14.62
7	30	400	0.08	5.84	-15.33
8	30	500	0.07	6.20	-15.85
9	40	200	0.07	1.69	-4.56
10	40	300	0.08	3.66	-11.27
11	40	400	0.05	3.57	-11.05
12	40	500	0.06	4.95	-13.89
13	50	200	0.08	1.34	-2.54
14	50	300	0.07	2.2	-6.85
15	50	400	0.06	3.37	-10.55
16	50	500	0.05	4.03	-12.11

2.2 SLM 工艺参数对表面粗糙度信噪比的影响

为了进一步分析 SLM 工艺参数对制备 NiTi 合金样品表面粗糙度的影响规律,采用方差分析方法,对各工艺参数与表面粗糙度之间的关系进行分析,确定不同工艺参数对表面粗糙度的影响程度。表 3 为信噪

表 3 信噪比值方差分析结果
Tab.3 Analysis of variance for S/N ratios

Source	d_f	Sum of squares	F	P	Statistical significance
Laser power	3	67.775	20.37	0.002	Highly significant
Scanning speed	3	21.456	6.45	0.026	Significant
Hatch space	3	6.942	2.09	0.203	Non-significant
Residual error	6	3.327			
Total	15	99.5			

比值的方差分析,表中 d_f 表示对应参数的自由度, F 是均方差比值,使用 F 值来计算对应的 P 值。通过对比 P 值与显著性水平 α (0.05)之间的大小来评估原假设来确定响应与模型中各工艺参数选项之间的关联性, P 值小于 α 值时,证明该参数与表面粗糙度之间的关联在统计意义上显著^[25]。扫描间距对应的 P 值为0.203,大于0.05,说明其对SLM制备NiTi合金的表面粗糙度影响不明显,而激光功率和扫描速度对应的 P 值均小于0.05,说明激光功率和扫描速度对其影响显著。而 P 值越小表示该因素对表面粗糙度的影响越大,激光功率和扫描速度对应的值分别为0.002和0.026,这就证明相较于扫描速度,激光功率对表面粗糙度的影响更明显。综合对比各工艺参数对表面粗糙度的影响程度,得出对表面粗糙度的影响程度由大到小排列为:激光功率、扫描速度、扫描间距。

表4为各因素对表面粗糙度信噪比的响应,表中是各因素在不同水平下的信噪比值。表中也包含有基于Delta(极差)统计排名,对比了各因素对表面粗糙度影响的相对大小。极差值是每个因素的最高平均值减去最低平均值,排序(Rank)为1,表示极差值最大,代表该因素对试验目标的影响最大,排序为3,表示该因素对试验目标的影响最小。图5为表面粗糙度信噪比的主效应图,从图中可以看出各工艺参数对表面粗糙度信噪比值的影响趋势,斜率不同则代表该因素对表面粗糙度的影响程度不同,斜率越大表示该因素影响程度越大。结合图5和表4可以看出,激光功率的斜率和极差是最大的,其次是扫描速度,最后是扫描间距,说明激光功率对表面粗糙度的影响最显

表 4 各因素对表面粗糙度信噪比的响应
Tab.4 Response of each factor on the signal-to-noise ratio of surface roughness

Level	Smaller-the-better $R_{S/N}$			dB
	Laser power	Scanning speed	Hatch space	
1	-16.770	-9.487	-13.430	
2	-15.173	-12.208	-13.861	
3	-10.193	-13.532	-11.112	
4	-8.012	-14.922	-11.745	
Delta	8.757	5.435	2.748	
Rank	1	2	3	

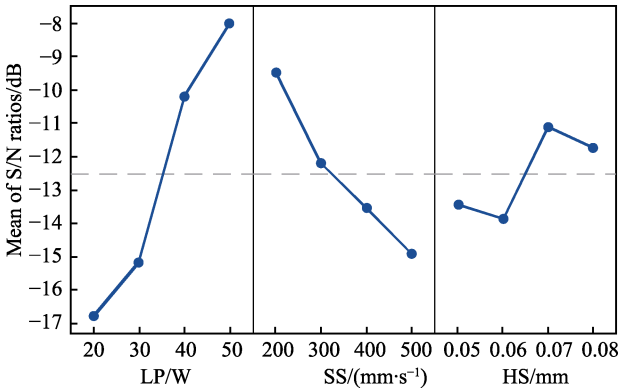


图 5 NiTi 表面粗糙度值信噪比的主效应图
Fig.5 Main effect plot for S/N ratios for S_a of NiTi parts

著。从图5可以看出,在本试验各工艺参数取值范围内,当激光功率为50W、扫描速度为200mm/s、扫描间距为0.07mm时,表面粗糙度最小,为最佳工艺参数。

3 最优参数结果验证及讨论分析

3.1 最优参数的预测和验证

基于 L_{16} 田口方法设计的试验结果,通过回归分析建立表面粗糙度(S_a)与各工艺参数之间的数学模型。基于之前的分析,响应方程考虑了激光功率(W_{LP})、扫描速度(v_{SS})和扫描间距(d_{HS})与表面粗糙度(S_a)的关系。具体方程如公式(3)所示。

$$S_a=8.34-0.148\ 1W_{LP}+0.006\ 69v_{SS}-11.9d_{HS}\quad (3)$$

决定系数 R^2 是用来衡量拟合方程的整体拟合度, R^2 值越接近1,表示拟合方程与实际值越接近。本方程的 R^2 值为88.63%,说明数学模型与实际数据拟合较好,对表面粗糙度值的预测准确。为了验证预测值与试验值的误差,首先将最优工艺参数组合下各工艺参数值代入公式(3)中,用拟合方程计算出预测的表面粗糙度值,然后与在最优工艺参数组合制备出样品表面粗糙度测量值进行比较,并根据公式(2)计算出对应的信噪比值,具体值如表5所示。从表中可以发现模型预测的表面粗糙度值为1.43 μm ,与实际试验制备样品的粗糙度值(1.38 μm)非常接近,理论值和实际值仅相差9.97%,也证明了数学模型与数据有较好的拟合,为优化工艺参数提供了指导作用。

表 5 最优工艺参数粗糙度预测值和试验值
Tab.5 Predicted and experimental value of roughness under optimal process parameters

Control factors			Predicted vale		Experimental value	
LP/W	SS/(mm·s ⁻¹)	HS/mm	S _a /μm	R _S /N/dB	S _a /μm	R _S /N/dB
50	200	0.07	1.43	-3.11	1.38	-2.80

3.2 成形工艺对表面粗糙度的影响分析

图 6 为不同工艺参数对表面粗糙度影响的交互图。从图 6a、b 可以发现，随着扫描间距的变化，样品表面粗糙度值没有明显的改变，说明扫描间距对表面粗糙度的影响不显著。从图 6a、c 均可以发现，随着激光功率的增大，表面粗糙度逐渐下降，这与图 4 观察到的样品表面高度形貌三维图结果一致，出现这样的现象主要是由于在低功率条件下，激光功率越小，热输入越低，NiTi 粉末熔化不充分，熔道不连续。通过对样品表面形貌（图 7）观察也可以发现，由于熔化不足，出现熔道不连续现象以及未熔化的粉末，增大激光功率有明显的改善，在激光功率为 40 W 和 50 W 时，样品表面的未熔粉末消失。在相同的激光功率下，降低扫描速度，表面粗糙度也会有一定的降低，可能是由于扫描速度的降低，提高了热输入并且增加了激光束作用于粉末的时间，降低了熔池冷却速度，使得粉末有更加充分的时间熔化和铺展流动，有助于降低表面起伏，但效果低于激光功率的增大，这是因为在选区激光熔化过程中，粉末对激光的吸收率

随功率的增大而增大，增加激光功率可以高效地提高 NiTi 粉末对能量的吸收量。从图 6c 也可以发现，在相同功率下，不论功率大小，随着扫描速度的降低，表面粗糙度逐渐减小，这是由于在激光功率固定的情况下，降低扫描速度可以增加能量输入，使得粉末有足够的时间熔化，表面缺陷减少，表面粗糙度降低。

为了进一步解释激光功率、扫描速度和扫描间距对表面粗糙度的影响机理，需要明白不同工艺参数对熔池形貌的影响规律。图 8 为激光功率、扫描速度和扫描间距对熔池形貌的影响示意图。如图 8 所示，随着激光功率的增大，热输入增大，并且粉末对能量的吸收率也有提高，使得 NiTi 粉末吸收足够的能量来保证粉末熔化充分，熔池铺展性更好，凝固后表面变得越来越平整，制备样品的表面起伏减小，表面粗糙度显著降低。随着扫描速度的增大，热输入减小，粉末熔化不充分，而且 NiTi 合金的导热性差，能量的吸收和传递需要一定的时间，使得扫描速度越大，熔池表面起伏越大，制备的样品表面起伏增大，表面粗糙度增大。扫描间距的变化对于粗糙度影响原理是间

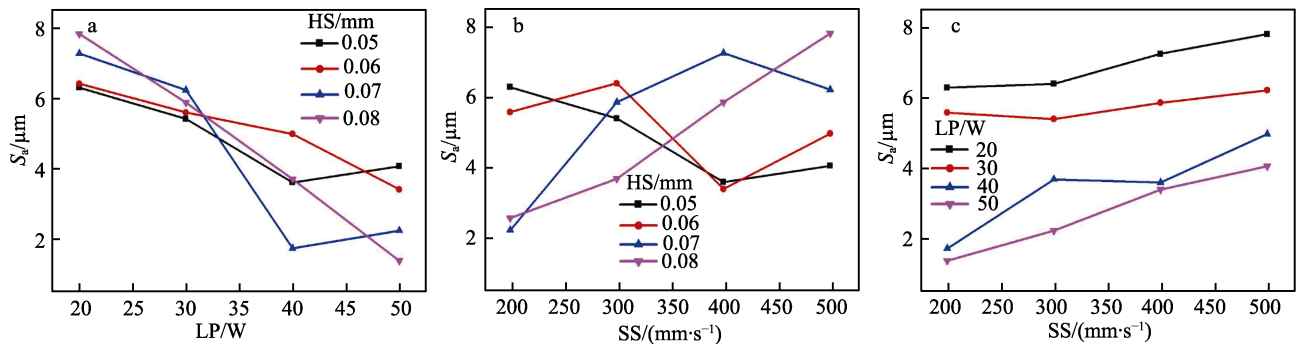


图 6 各因素对表面粗糙度的影响
Fig.6 Effect of various factors on surface roughness

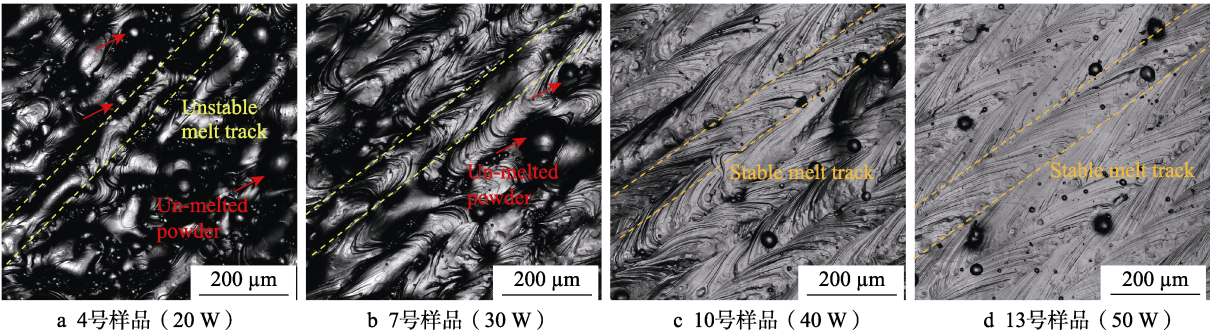


图 7 不同工艺参数制备样品的表面形貌
Fig.7 Morphology of samples under different parameter combinations: a) sample 4 (20 W); b) sample 7 (30 W); c) sample 10 (40 W); d) sample 13 (50 W)

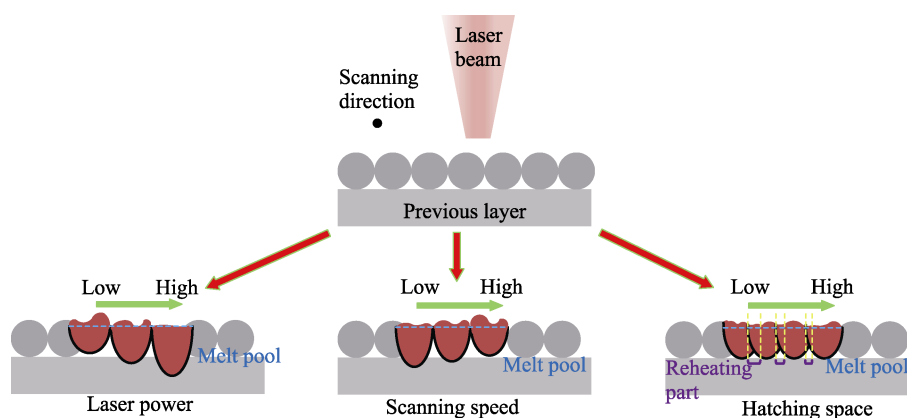


图 8 激光功率、扫描速度和扫描间距对熔池形貌的影响示意图

Fig.8 Schematic diagram for the effect of laser powder, scanning speed and hatching space on the melt pool morphology

距的改变,对前一熔道的重熔部分也发生变化,间距越小,重熔部分越多,可以有效地降低样品的表面起伏,减小粗糙度。在本研究中样品表面粗糙度大,主要是因为热输入不足,粉末熔化不够充分,即使降低扫描间距、增加重熔区域,粉末未熔化现象改善不明显,最终表现出扫描间距对表面粗糙度的影响不显著。

4 结论

1) 在激光功率为 20 W 和 30 W 时,由于能量输入不足,粉末不能充分熔化,不能形成稳定连续的熔道,表面粗糙度值最大可达 $7.8\ \mu\text{m}$,通过增加激光功率到 40 W 和 50 W 时,表面粗糙度明显降低,在功率为 50 W 时,表面粗糙度值最小,为 $1.38\ \mu\text{m}$ 。

2) 激光功率对表面粗糙度的影响最大,扫描速度次之,扫描间距最小。

3) 基于信噪比越小制备的 NiTi 零件表面粗糙度值越低,得出的最优工艺参数组合为激光功率 50 W、扫描速度 200 mm/s、扫描间距 0.07 mm,并根据拟合模型,验证了最优工艺参数组合表面粗糙度信噪比预测值为 $-3.11\ \text{dB}$,试验值为 $-2.80\ \text{dB}$,理论值和实际值仅相差 9.97%。

参考文献:

- [1] OSTROPIKO E, YU KONSTANTINOV A. Functional Behaviour of TiNi Shape Memory Alloy after High Strain Rate Deformation[J]. Materials Science and Technology, 2021, 37(8): 794-804.
- [2] OSTROPIKO E, MAGAZINOV S, KRIVOSHEEV S. Uniaxial Magnetic Pulse Tension of TiNi Alloy with Experimental Strain Rate Evaluation[J]. Experimental Mechanics, 2022, 62(6): 1027-1036.
- [3] BANSIDDHI A, SARGEANT T D, STUPP S I, et al. Porous NiTi for Bone Implants: A Review[J]. Acta Biomaterialia, 2008, 4(4): 773-782.
- [4] LAGOUDAS D C. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications[M]. New York: Springer, 2008.
- [5] KHOO Z X, LIU Y, AN J, et al. A Review of Selective Laser Melted NiTi Shape Memory Alloy[J]. Materials, 2018, 11(4): 519.
- [6] LEO D J. Engineering Analysis of Smart Material Systems [M]. Hoboken: Wiley, 2007.
- [7] MOHD KHALIL A N, AZMI A I, MURAD M N, et al. The Effect of Cutting Parameters on Cutting Force and Tool Wear in Machining Nickel Titanium Shape Memory Alloy ASTM F2063 under Minimum Quantity Nanolubricant [J]. Procedia CIRP, 2018, 77: 227-230.
- [8] ELAHINIA M H, HASHEMI M, TABESH M, et al. Manufacturing and Processing of NiTi Implants: A Review [J]. Progress in Materials Science, 2012, 57(5): 911-946.
- [9] HABIBIAN T, HABERLAND C, MEIER H, et al. The Biocompatibility of Dense and Porous Nickel-Titanium Produced by Selective Laser Melting[J]. Materials Science & Engineering C, Materials for Biological Applications, 2013, 33(1): 419-426.
- [10] HABERLAND C, ELAHINIA M, WALKER J M, et al. On the Development of High Quality NiTi Shape Memory and Pseudoelastic Parts by Additive Manufacturing[J]. Smart Material Structures, 2014, 23(10): 104002.
- [11] ANDANI M T, SHAYESTEH MOGHADDAM N, HABERLAND C, et al. Metals for Bone Implants. Part 1. Powder Metallurgy and Implant Rendering[J]. Acta Biomaterialia, 2014, 10(10): 4058-4070.
- [12] KHOO Z X, LIU Y, LOW Z H, et al. Fabrication of SLM NiTi Shape Memory Alloy via Repetitive Laser Scanning [J]. Shape Memory and Superelasticity, 2018, 4(1): 112-120.
- [13] KIM W R, BANG G B, KWON O, et al. Fabrication of Porous Pure Titanium via Selective Laser Melting under Low-Energy-Density Process Conditions[J]. Materials & Design, 2020, 195: 109035.
- [14] CALIGNANO F, MANFREDI D, AMBROSIO E P, et al. Influence of Process Parameters on Surface Roughness of Aluminum Parts Produced by DMLS[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013,

- 67(9): 2743-2751.
- [15] 黄卫东, 张伟杰, 练国富, 等. SLM 成形工艺参数对 316L 不锈钢成形件表面粗糙度的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(1): 35-41.
HUANG W D, ZHANG W J, LIAN G F, et al. Effect of SLM Forming Process Parameters on Surface Roughness of 316L Stainless Steel Parts[J]. Applied Laser, 2020, 40(1): 35-41.
- [16] WANG L Z, WANG S, WU J J. Experimental Investigation on Densification Behavior and Surface Roughness of AlSi10Mg Powders Produced by Selective Laser Melting[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 96: 88-96.
- [17] CARTER L N, VILLAPÚN V M, GROVER L, et al. Exploring the Duality of Powder Adhesion and Underlying Surface Roughness in Laser Powder Bed Fusion Processed Ti-6Al-4V[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 81: 14-26.
- [18] OLIVEIRA J P, CAVALEIRO A J, SCHELL N, et al. Effects of Laser Processing on the Transformation Characteristics of NiTi: A Contribute to Additive Manufacturing[J]. Scripta Materialia, 2018, 152: 122-126.
- [19] LU H Z, MA H W, CAI W S, et al. Stable Tensile Recovery Strain Induced by a Ni_4Ti_3 Nanoprecipitate in a $\text{Ni}_{50.4}\text{Ti}_{49.6}$ Shape Memory Alloy Fabricated via Selective Laser Melting[J]. Acta Materialia, 2021, 219: 117261.
- [20] TAN C L, LI S, ESSA K, et al. Laser Powder Bed Fusion of Ti-Rich TiNi Lattice Structures: Process Optimisation, Geometrical Integrity, and Phase Transformations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 141: 19-29.
- [21] 高雄. 基于田口方法的 BGA 封装参数优化[D]. 南京: 东南大学, 2012: 3-5.
GAO X. Optimization of BGA Package Parameters Based on Taguchi Method[D]. Nanjing: Southeast University, 2012: 3-5.
- [22] BARRETT J D. Taguchi's Quality Engineering Handbook[J]. Technometrics, 2007, 49(2): 224-225.
- [23] 张春飞, 张宇, 李忠科, 等. 基于田口法的高速切削参数优化研究与应用[J]. 现代制造工程, 2006(8): 78-80.
ZHANG C F, ZHANG Y, LI Z K, et al. Research and Application of Cutting Parameters of High-Speed Machining Based on Taguchi Method[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006(8): 78-80.
- [24] 刘勤远. 利用田口方法改善产品主轴质量稳定性[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 40-46.
LIU Q Y. Taguchi Method to Improve the Stability Quality of Shaft Products[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 40-46.
- [25] 杨德. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 208-211.
YANG D. Experimental Design and Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 208-211.
-
- (上接第 199 页)
- [17] LEE Y S, FARSON D F. Surface Tension-Powered Build Dimension Control in Laser Additive Manufacturing Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5): 1035-1044.
- [18] GE H, XU H, WANG J, et al. Investigation on Composition Distribution of Dissimilar Laser Cladding Process Using a Three-Phase Model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170: 120975.
- [19] PARIONA M M, TAQUES A F, WOICIECHOWSKI L A. The Marangoni Effect on Microstructure Properties and Morphology of Laser-Treated Al-Fe Alloy with Single Track by FEM: Varying the Laser Beam Velocity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 119: 10-19.
- [20] 刘晗. 丝粉同步激光沉积增材制造熔池行为及成形控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
LIU H. Research on Molten Pool Behavior and Forming Control of Combined Wire-Powder Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [21] 石世宏, 王晨, 徐爱琴, 等. 基于环形激光内送粉激光熔覆温度场的数值模拟[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303002.
SHI S H, WANG C, XU A Q, et al. Temperature Field Numerical Simulation of Laser Cladding Based on Internal Powder Feeding through a Hollow Laser Beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0303002.
- [22] 姚朝晖. 计算流体力学入门[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
YAO Z H. Computational Fluid Dynamics—The Basics with Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [23] 史建军. 悬垂结构激光内送粉熔覆成形工艺及机理研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
SHI J J. Process and Forming Mechanism of Non-Supportive Overhang Part by Annular Laser Cladding[D]. Suzhou: Soochow University, 2018.
- [24] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京: 新时代出版社, 1987.
ZHANG J R, ZHAO Y Y. Handbook of Thermophysical Properties of Commonly Used Substances in Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987.
- [25] 田美玲, 石世宏, 傅戈雁, 等. 中空激光光内送粉熔覆技术的熔池流场与温度场模拟[J]. 电加工与模具, 2013(6): 62-66.
TIAN M L, SHI S H, FU G Y, et al. Simulation of Flow and Temperature Field of the Molten Pool of Hollow Inside-Laser Coaxial Powder Feeding Cladding[J]. Electromachining & Mould, 2013(6): 62-66.