

基于 SLM 的 18Ni-300 模具钢工艺参数优化

朱逸韬,黄卫东,张伟杰,陈侠宇,赖章鹏

(福建工程学院 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118)

摘要: 设计了以激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度为因素的正交实验,研究了 SLM 成型 18Ni-300 模具钢粉末过程中各个工艺参数对成型件致密度的影响规律,并进行了工艺参数优化。实验表明,在选定范围内,成型件致密度随激光功率的增加先增大后减小;随扫描速度的增加持续减小;随扫描间距的增加先增加后减小;随铺粉厚度的增加持续减小。最优工艺参数组为激光功率 260 W、扫描速度 500 mm/s、扫描间距 0.11 mm、铺粉厚度 0.02 mm 时,成型件致密度 99.99%,为所有实验中的最优值。

关键词: 激光选区熔化;致密度;工具钢;田口试验分析

中图分类号: TG142

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)06-0570-06

Process parameter optimization of 18Ni-300 tool steel based on selective laser melting

ZHU Yitao, HUANG Weidong, ZHANG Weijie, CHEN Xiayu, LAI Zhangpeng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118)

Abstract: A Taguchi experiment was designed with laser power, scan speed, hatch space and layer thickness as factors. The effects of each processing parameter on the density of the molded parts in the process of SLM of 18Ni-300 tool steel powder was studied, and the process parameters were optimized. Experiments show that in the selected range, the density of the forming part first increases and then decreases with the increase of laser power; with the increase of scanning speed, the density decreases continuously; with the increase of hatch space, it first increases and then decreases; with the increase of layer thickness, it decreases continuously. The optimal process parameters were as follows: when the laser power was 260W, the scanning speed was 500mm/s, the hatch space was 0.11mm, and the layer thickness was 0.02mm, the resulted density was 99.99%, which was the optimal value in all the experiments.

Keywords: selective laser melting (SLM); density; tool steel; Taguchi experiment

激光选区熔化(selective laser melting, SLM)是一种利用高能量激光束逐层选择性地熔化金属粉末,通过逐层铺粉,逐层熔化凝固堆积的方式,制造三维实体零件的快速成型技术^[1-2]。而在实际的成型过程中,成型工艺参数选择不当时,会造成成型件的缺陷,如孔隙、裂纹、翘曲、未融化颗粒等^[3-4],从而影响最终的成型质量。因此,SLM 成型过程中工艺参数的合理选取,对于保证成型件

的质量具有重要意义^[5]。

对于 SLM 成型工艺参数与成型件性能之间的关联,国内外的学者都做了一定的研究。Fer-reira^[6]等研究了扫描速度对 18Ni-300 模具钢成型件孔隙率和力学性能的影响;程博^[7]等研究了激光功率和扫描速度对 18Ni-300 模具钢成型件成型性能的影响规律;杨立军^[8]等研究了工艺参数对 316L 合金 SLM 成型件致密度和硬度的影响;

收稿日期: 2020-09-25

第一作者简介: 朱逸韬(1996—),男,浙江湖州人,硕士研究生,研究方向:快速成型技术。

通信作者: 黄卫东(1971—),男,福建福州人,教授,硕士,研究方向:先进制造工艺及装备。

马英怡^[9]等研究了扫描速度对 316L 合金 SLM 成型件的性能的影响; Campanelli^[10]等研究了工艺参数对 18Ni-300 模具钢 SLM 成型件致密度的影响; 魏富涛^[11]等研究了工艺参数对 18Ni-300 模具钢 SLM 成型件相对密度和力学性能的影响。

综上所述, 国内外学者针对 SLM 成型 18Ni300 模具钢的致密度和力学性能做了一定的研究, 但较少从激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度等 4 个因素研究 18Ni-300 模具钢 SLM 成型件致密度的影响规律。本实验采用正交实验法, 探索 SLM 成型工艺参数对 18Ni300 模具钢成型件致密度的影响规律, 并确定最优工艺参数

组合。

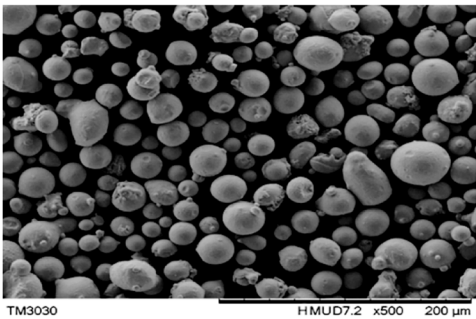
1 实验设备和方法

1.1 实验设备

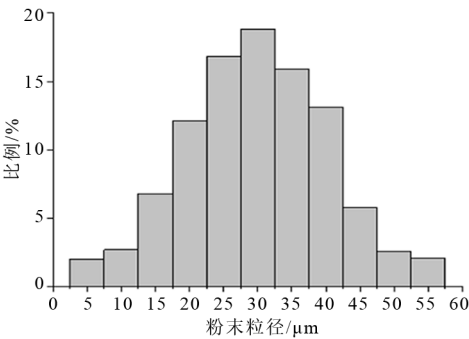
本实验设备选用德国 SLM solutions 公司出厂的型号为 SLM 125 HL 的金属打印机, 其光斑直径可选范围为 70~100 μm。实验材料为 SLM Solution 公司生产的 18Ni300 模具钢粉末, 其粒径范围为 5~55 μm。表 1 为实验中使用的 18Ni300 模具钢粉末的化学成分。图 1 为 18Ni300 模具钢粉末形貌及粉末粒径。成型粉末在 80 ℃ 下真空烘干 8 h。成型基板材料为 45 钢。

表 1 18Ni-300 模具钢粉末化学成分
Tab.1 Chemical composition of 18Ni-300 tool steel powder

元素	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Mn	Si	P	S	C	Fe
质量分数/%	18~19	8.5~9.5	4.7~5.2	0.5~0.8	0.05~0.15	0~0.10	0~0.1	0~0.01	0~0.01	0~0.03	Bal.



(a) 形貌



(b) 粒径

图 1 18Ni-300 模具钢粉末
Fig.1 18Ni-300 tool steel powder

1.2 测量方法及设备

样件先用丙酮清洗, 再用无水乙醇清洗, 真空烘干后根据阿基米德排水法, 使用 Mettler Toledo ME204E 分析天平确定 SLM 样品的致密度。对样品的横截面进行打磨、抛光, 使用 Hitachi TM3030plus 台式扫描电子显微镜观察样件的微观结构。

1.3 实验设计

本实验使用了 4 个工艺参数, 采用 4 因素 4 水平正交试验设计, 如表 2 所示。本实验制备 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体样品用于检测致密度。

表 2 工艺参数

Tab.2 Process parameters

水平	激光功率/W	扫描速度/ (mm · s ⁻¹)	铺粉厚度/ mm	扫描间距/ mm
水平 1	180	500	0.020	0.08
水平 2	220	700	0.035	0.11
水平 3	260	900	0.050	0.14
水平 4	300	1 100	0.065	0.17

2 实验结果

2.1 实验结果

16 个成型件样品的实验测量结果如表 3 所示。接下来对实验结果进一步统计分析。

表 3 样品测量结果
Tab.3 Sample measurement results

样品 编号	激光功 率/W	扫描速度/ (mm·s ⁻¹)	扫描间 距/mm	铺粉厚 度/mm	致密 度/%
1	180	500	0.08	0.020	96.68
2	180	700	0.11	0.035	97.50
3	180	900	0.14	0.050	93.35
4	180	1 100	0.17	0.065	90.24
5	220	500	0.11	0.050	99.79
6	220	700	0.08	0.065	98.08
7	220	900	0.17	0.020	97.57
8	220	1 100	0.14	0.035	95.41
9	260	500	0.14	0.065	98.01
10	260	700	0.17	0.050	98.01
11	260	900	0.08	0.035	99.98
12	260	1 100	0.11	0.020	99.79
13	300	500	0.17	0.035	98.22
14	300	700	0.14	0.020	99.02
15	300	900	0.11	0.065	98.07
16	300	1 100	0.08	0.050	99.09

2.2 极差分析

采用正交实验的极差分析法对实验结果进行分析。计算 K 值,即为同一因素同一水平的情况下,所代表的实验测量结果之和。在计算同一因素不同水平的 K 值时, K 值结果为最大,则表示该因素在这一水平所代表的工艺参数为最优。经计算,激光功率为 260 W,扫描速度为 500 mm/s,扫描间距为 0.11 mm,铺粉厚度为 0.02 mm 时, K 值为最大,分别为 395.79, 392.70, 395.15, 393.06。在计算同一因素不同水平的 K 值时,得到 K 最小值,将同一因素的 K 最大值与 K 最小值相减,可以得到极差 R 。经计算,激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度这 4 个因素的 R 值分别为 18.02、

8.17、9.79、8.66。对比 R 的数值大小,可以得到实验因素对实验结果影响的排序为激光功率、扫描间距、铺粉厚度、扫描速度。

2.3 方差分析

方差分析法可以反映出每一个工艺参数对检测指标的影响程度。首先计算总离差平方和为 98.06。计算各因素及误差引起的离差平方和,激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度 4 因素的离差平方和分别为 50.71、11.18、23.52、10.41,误差离差平方和为 2.24。接下来计算自由度,总自由度为 15。随后计算均方,分别得到激光功率、扫描间距、铺粉厚度、扫描速度的均方为 16.90、3.73、7.84、3.47,误差的均方为 0.75。最后将各因素的均方除以误差均方得到激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度的检验值,分别为 22.64、4.99、10.50、4.65。由此可知激光功率、扫描间距对成型件的致密度影响显著,而扫描速度、铺粉厚度影响不显著。

2.4 验证实验

通过上述分析可知,最优工艺参数组合为激光功率 260 W、扫描速度 500 mm/s、铺粉厚度 0.02 mm、扫描间距 0.11 mm,应用此工艺参数组合进行 18Ni-300 模具钢粉末 SLM 成型实验,得到的成型件致密度为 99.99%,优于所有上述工艺参数组合的样件。

3 各工艺参数对成型件致密度影响规律分析

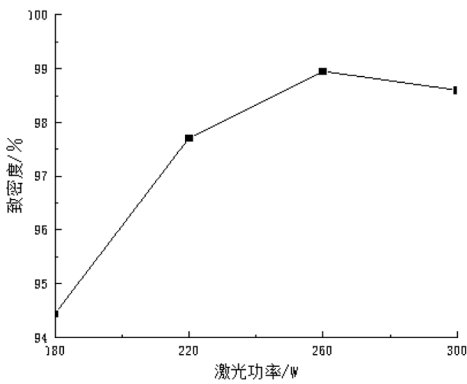
通过对实验数据处理,得到如图 2 所示的各个工艺参数对成型件致密度的影响规律趋势图。

3.1 激光功率对致密度的影响

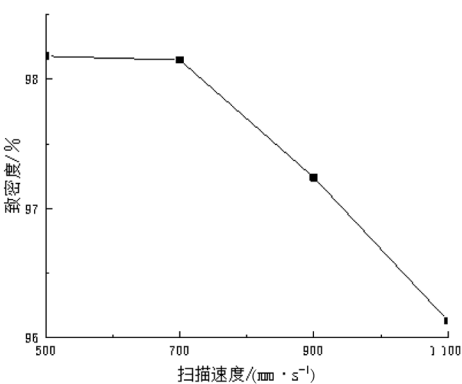
由图 2(a)可看出,激光功率从 180 W 增加到 300 W 时,成型件的致密度呈现先增大后减小的趋势。图 3(a)是激光功率为 180 W 时,成型件剖面形貌图,从图中可以看出,成型件内部存在孔隙。在激光功率较低时,粉末接收到的能量不足,粉末无法充分熔化,熔体流动性不足从而导致熔体在熔道内的铺展质量较差,熔池连续性差。此时成型件内部出现较多的孔隙,致密度低。图 3(b)为激光功率为 260 W 时,成型件剖面形貌图,从图中可以看出,成型件成型质量较好,致密度高。激光功率持续增加到 300 W,此时激光功率过大,粉末接收的能量过多,熔池内出现大量的金

属蒸汽,并使得粉末产生严重的飞溅现象,导致熔池中的液相金属无法充分铺展到整个熔道,如图 4 所示。此时,熔池内出现孔洞,同时大量的飞溅

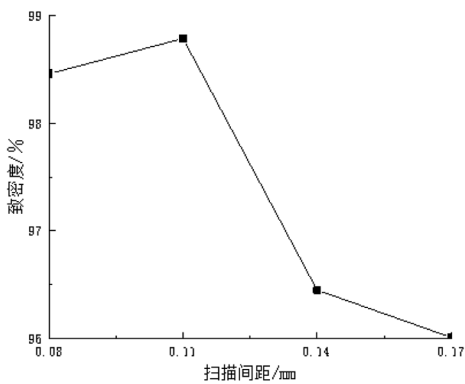
物落在成型面上,从而致密度下降,此时成型件剖面形貌图如图 3(c) 所示。因此,选择合适的激光功率能够提高成型件的致密度。



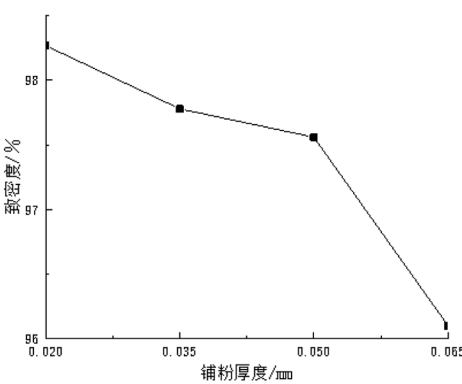
(a) 激光功率对成型件致密度的影响



(b) 扫描速度对成型件致密度的影响



(c) 扫描间距对成型件致密度的影响



(d) 铺粉厚度对成型件致密度的影响

图 2 工艺参数对成型件致密度的影响规律

Fig.2 Effects of process parameters on the density of molded parts

3.2 扫描速度对致密度的影响

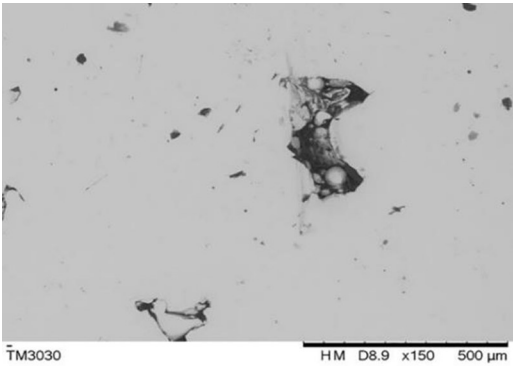
由图 3(b)可以看出,扫描速度在 500 mm/s~1 100 mm/s 时,成型件的致密度呈现持续下降的趋势。在激光扫描的过程中,扫描速度影响激光在粉末上的停留时间。激光在粉末上停留的时间比较合适时,粉末熔化和液相铺展充分,所以在实验扫描速度为 500 mm/s 时,成型件的致密度高。随着扫描速度逐渐增加,激光在粉末上停留的时间减少,粉末熔化加快,熔池的冷却速率增加。当扫描速度过高时,激光在粉末上作用的时间过短,此时熔池中粉末吸收的能量不足以使其熔化,熔池变窄,液相形成较少且流动能力不足,无法铺展整个熔池,并在层与层间残留未熔化的粉末。因此在熔池中形成大量孔隙,降低了成型件的致密度。

3.3 扫描间距对致密度的影响

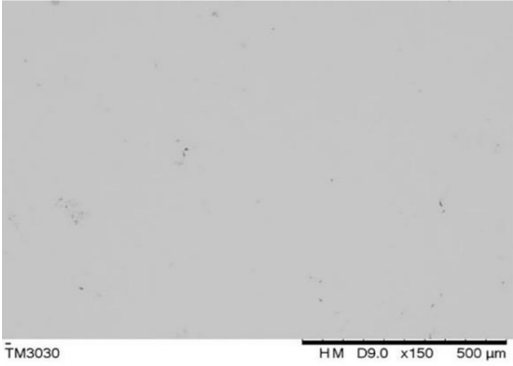
由图 3(c)可以看出,扫描间距从 0.08 mm 增加到 0.17 mm,致密度先增大后减小。扫描间距影响相邻熔道的搭接率。搭接率计算公式为:

$$\Phi = \frac{W - \delta}{W} = \frac{s}{W} \tag{1}$$

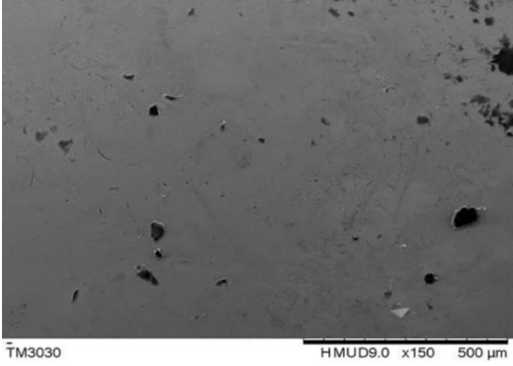
W 为熔池宽度,单位: mm; s 为搭接宽度,单位 mm; δ 为扫描间距,单位: mm。由式(1)可知,搭接率随着扫描间距的增大而减小。当扫描间距过大时,熔道搭接率过小,会导致每一成型层内部的相邻熔道之间的粉末无法充分熔化,从而存在孔洞。在这种情况下层层结合,会导致层与层之间、熔池与熔池之间结合强度下降,同时致密度下降。当扫描间距过小时,导致熔道搭接率过大,搭接处获得大量的能量,出现过熔及金属蒸汽飞溅的情



(a) 激光功率180 w



(b) 激光功率260 w



(c) 激光功率300 w

图 3 成型件剖面的形貌图

Fig.3 Topography of the profile of the formed part

况,产生大量孔隙,降低成型件的致密度。在实验中,选用扫描间距为 0.11 mm,成型件获得更好的致密度。

3.4 铺粉厚度对致密度的影响

由图 2(d)可看出,铺粉厚度从 0.02 mm 增加到 0.065 mm 时致密度呈现持续减小的趋势。铺粉厚度选取合适,粉末熔融充分,并且激光可以透过粉末对上一层熔化成型的表面进行一次重熔,从而使其表面更为平整,使得每一层都可以得到良好的熔融质量,层层积累后,不易出现孔隙,成

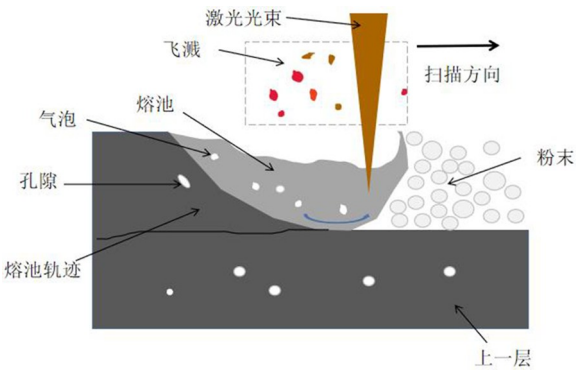
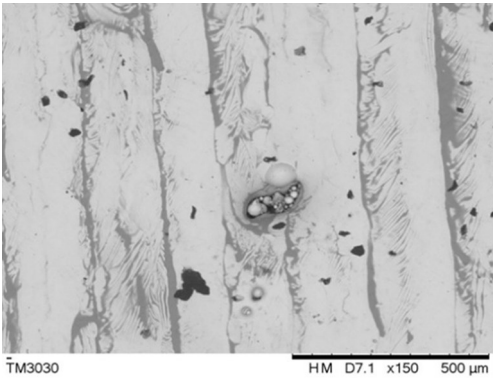


图 4 熔池内粉末飞溅行为示意图

Fig.4 Schematic diagram of powder splash behavior in the molten pool

型件致密度较好。铺粉厚度的增加,使得粉末完全熔化需要的能量增多,但此时的能量无法使粉末完全熔化,如图 5(a)所示。熔池中的液相金属在粉层底部未熔粉末作用下无法充分铺展或者出现断开现象,使得整个熔道出现间隙现象^[12]。同时未熔粉末和飞溅物的层层堆积,造成凹陷和凸起等缺陷,如图 5(b)所示。这些在 SLM 中常见的缺陷会导致成型件致密度的下降。



(a) 未熔化粉末



(b) 凹陷和凸起

图 5 熔池形貌图

Fig.5 Topography of molten pool

4 结论

1) SLM成型18Ni-300模具钢粉末时,成型件的致密度与激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度等工艺参数的选择有关。最优工艺参数组合是激光功率260 W、扫描速度500 mm/s、扫描间距0.11 mm、铺粉厚度0.02 mm。验证实验结果成型件的致密度为99.99%,均高于其他工艺参数组。

2) 激光功率、扫描速度的大小影响激光能量

密度和激光停留时间,从而影响成型件的致密度,两者要合理匹配,既要保证成型件的质量,又要尽可能地选择较大的扫描速度来提高成型效率。

3) 扫描间距影响熔道的搭接率,从而影响搭接处粉末接收激光能量的大小及成型件的致密度。随着扫描间距增大,成型件致密度呈现先增大后减小的趋势。

4) 铺粉厚度影响粉末熔化的深度,从而影响成型件的致密度,随着铺粉厚度增大,成型件致密度呈现逐步减少的趋势。

参考文献:

- [1] 谭超林,周克崧,马文有,等.激光增材制造成型马氏体时效钢研究进展[J].金属学报,2020,56(1):36-52.
- [2] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,等.航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J].中国激光,2020,47(5):32-55.
- [3] 白玉超.马氏体时效钢激光选区熔化成型机理及其控性研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [4] 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):163-169.
- [5] 陈侠宇,黄卫东,张伟杰,等.基于灰色关联分析的选区激光熔化成形18Ni-300模具钢多目标工艺优化[J].中国激光,2020,47(5):341-351.
- [6] FERREIRA J, SANTOS L, DA SILVA J, et al. Assessment of the fatigue life on functional hybrid laser sintering steel components[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 1: 126-133.
- [7] 程博,张璧,白倩,等.选区激光熔化马氏体时效钢(18Ni-300)工艺参数研究[J].大连理工大学学报,2018,58(5):471-478.
- [8] 杨立军,郑航,李俊.激光选区熔化制造工艺参数对316L成型件致密度与表面硬度的影响规律研究[J].应用激光,2020,40(1):7-12.
- [9] 马英怡,刘玉德,石文天,等.扫描速度对选区激光熔化316L不锈钢粉末成形缺陷及性能的影响[J].激光与光电子学进展,2019,56(10):210-219.
- [10] CAMPANELLI S, ANGELASTRO A, SIGNORILE C, et al. Investigation on direct laser powder deposition of 18 Ni (300) marage steel using mathematical model and experimental characterization[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1/2/3/4): 885-895.
- [11] 魏富涛,许冠,毛卫东,等.18Ni-300模具钢激光选区熔化工艺优化及力学性能研究[J].粉末冶金技术,2019,37(3):214-219.
- [12] MAXIMENKO A, OLEVSKY E. Pore filling during selective laser melting-assisted additive manufacturing of composites [J]. Scripta Materialia, 2018, 149: 75-78.

(责任编辑:陈雯)