

1Cr18Ni9Ti 激光选区熔化成形工艺参数对致密度的影响

邓竹君, 姚 斐, 柯林达, 肖美立, 赖彩芳

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘 要: 采用正交试验, 结合典型缺陷形成原因和微观组织, 研究了激光选区熔化成形工艺参数(激光功率、扫描速度和扫描间距)对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢致密度的影响, 分析了各工艺参数对致密度的影响规律。结果表明, 粉末熔化的能量输入密度主要取决于激光功率和扫描速度; 在激光功率 325~340 W、扫描速度 1 000~1 200 mm/s、扫描间距 0.12 mm 的工艺参数下, SLM 技术可制备致密度高于 99.9% 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢零件。采用优化后的 SLM 工艺参数成形 1Cr18Ni9Ti 不锈钢试棒的力学性能优于 QJ501A-98 标准, 抗拉强度 $R_m \geq 709$ MPa, 屈服强度 $R_{p0.2} \geq 547$ MPa, 断后伸长率 $A \geq 41\%$ 。

关键词: 激光选区熔化; 1Cr18Ni9Ti; 致密度; 力学性能

中图分类号: TH142.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)02-0125-04

Effect of Processing Parameters on Relative Density of 1Cr18Ni9Ti Parts by Selective Laser Melting

DENG Zhujun, YAO Fei, KE Linda, XIAO Meili, LAI Caifang

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract: The influence of selective laser melting process parameters (laser power, scanning speed and scanning distance) on the relative density of 1Cr18Ni9Ti stainless steel was studied by orthogonal test, combined with the formation cause and microstructure of typical defects. The influence law of each process parameter on relative density was analyzed. The results show that the energy input density of powder melting mainly depends on laser power and scanning speed. Under the process parameters of 325~340 W laser power, 1 000~1 200 mm/s scanning speed and 0.12 mm scanning interval, SLM process can prepare 1Cr18Ni9Ti stainless steel parts with relative density higher than 99.9%. The mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti stainless steel samples formed by optimized SLM process parameters are better than QJ501A-98 standard, with ultimate tensile strength greater than 709 MPa, yield strength greater than 547 MPa, and elongation after fracture greater than 41%.

Key words: selective laser melting; 1Cr18Ni9Ti; relative density; mechanical properties

激光选区熔化成形技术(SLM)是通过材料逐层添加制造三维零件的数字化制造技术, 具体是将金属粉末薄层预先铺置于成形表面, 利用激光束按预设的轨迹将粉末熔化-凝固成形金属零件。目前在航空航天、汽车、医疗、模具等行业, SLM 技术已用于制造不锈钢、钛合金、铝合金、高强钢、钴铬合金、高温合金等材料的复杂零件, 成形零件性能达到锻件标准^[1,2]。

1Cr18Ni9Ti 作为应用最广泛的奥氏体不锈钢之

一, 具有优异的可焊接性, 在航天产品研发阶段应用广泛^[3]。目前, 在文献中鲜有 SLM 成形 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的研究报道, 国内外学者对于不锈钢 SLM 成形的研究多集中于其它牌号。关凯研究了 304 不锈钢材料的 SLM 成形工艺, 得到了优于锻件的力学性能^[4]。靖冠乙等采用 SLM 技术成形 S-04 钢试样, 研究了热处理前后成形试样的显微组织及力学性能^[5]。Averyanova 等研究了粉末性质对 SLM 成形 17-4PH 马氏体不锈钢组织和性能的影响, 并实现了对成形件力学性能的调控^[6]。陈洪宇研究了 SLM 成形 5CrNi4Mo 模具钢的相变过程及其机制^[7]。

本文开展 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 SLM 成形工艺研究, 分析各工艺参数对致密度的影响规律, 为该材料 SLM 成形技术在航天产品上的应用提供技术基础。

收稿日期: 2019-08-26

基金项目: 上海市工程技术研究中心资助项目(15DZ22251000);
上海市科委基础研究项目(17JC1402600)

作者简介: 邓竹君(1987-), 江苏如皋人, 硕士, 工程师。主要从事增材制造技术研究方面的工作。电话: 021-37842610, E-mail: dengzhujun_dzj@163.com

1 试验方法

1.1 试验材料

试验采用气雾化的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢球形粉末,形貌如图 1 所示,粉末的化学成分见表 1。粉末粒径分布为: $D_{10} \leq 17.4 \mu\text{m}$, $D_{50} \leq 30 \mu\text{m}$, $D_{90} \leq 50.6 \mu\text{m}$ 。SLM 成形试验基板选用 50 mm 厚的 17-4PH 不锈钢板。

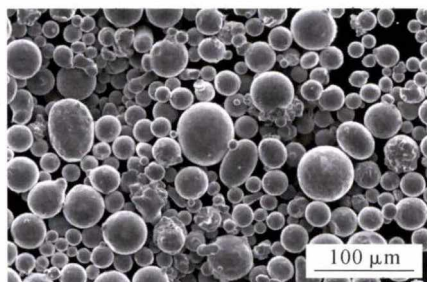


图 1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢粉末的扫描电镜形貌
Fig.1 SEM image of 1Cr18Ni9Ti powder

表 1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢粉末化学成分 $w(\%)$
Tab.1 Chemical composition of 1Cr18Ni9Ti powder

C	Cr	Ni	Si	Mn	S	P	Ti	Fe
0.036	17.91	9.59	0.57	1.57	0.003	0.017	0.55	余量

1.2 试验设备

选用华中科技大学研发的 NRD-SLM-300A 激光选区熔化成形设备,设备最大成形尺寸为 250 mm×250 mm×300 mm,其配置了一台 500 W 的光纤激光器。采用振镜式扫描方式,最大扫描速度为 7 000 mm/s,铺粉厚度为 20~60 μm 。在试验过程中成形腔充入高纯氩气,以满足 1Cr18Ni9Ti 不锈钢成形时的低氧环境要求。

1.3 试验方案

试验所用的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢粉末平均粒度约为 30 μm 。为保证铺粉质量,同时兼顾成形精度,切片厚度选择 40 μm 。影响 SLM 成形零件致密度的主要因素见表 2,分别是激光功率、扫描速度和扫描间距。将每个控制因子各取 3 个水平设计正交试验。成形试块尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm,为保证试验结果准确可靠,每组参数成形 3 个试块。

表 2 试验因子与水平
Tab.2 Experimental factors and level

水平	激光功率 A/W	扫描速度 B/mm·s ⁻¹	扫描间距 C/mm
1	275	800	0.12
2	325	1 100	0.13
3	375	1 400	0.14

试块致密度测试采用图像法。对于每个成形样品,采用含 2 mL HF+3 mL HNO₃+95 mL H₂O 的腐蚀液对试块纵截面(平行于试块生长方向)进行金

相腐蚀;利用 Leica DMR 光学显微镜,对每个截面取 3 张照片,通过二值图像法计算孔隙率,最后得到试样的致密度。SLM 成形的 1Cr18Ni9Ti 试棒按 GB/T228.1-2010 标准(图 2)机加工成 $\phi 5 \text{ mm}$ 的比例试样,测量其拉伸力学性能。

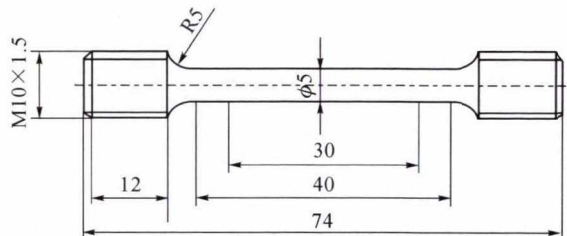


图 2 拉伸试样尺寸
Fig.2 The size of tensile specimen

2 试验结果及讨论

2.1 试验结果

表 3 为本次正交试验的设计方案与实验结果。

表 3 正交试验设计与结果
Tab.3 Orthogonal experimental design and results

试验号	A	B	C	致密度(%)		
				试块 1	试块 2	试块 3
1	1	1	1	98.23	98.26	98.41
2	1	2	2	98.42	98.17	98.35
3	1	3	3	98.14	98.31	98.22
4	2	1	2	99.10	99.21	99.16
5	2	2	3	99.30	99.34	99.28
6	2	3	1	99.38	99.27	99.42
7	3	1	3	99.67	99.58	99.64
8	3	2	1	99.86	99.76	99.89
9	3	3	2	99.80	99.84	99.72

2.2 激光功率与扫描速度对致密度的影响

SLM 成形过程中,粉末熔化的能量输入密度主要取决于激光功率和扫描速度。在三种不同的扫描速度下,分别采用三种激光功率开展 SLM 工艺试验,扫描间距固定为 0.12 mm。如图 3 所示,在不同扫描速度下,致密度随着激光功率的增大而提高。

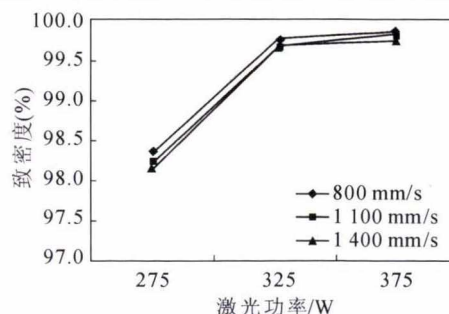


图 3 不同扫描速度下激光功率对致密度的影响
Fig.3 The relationship between laser power with density of different scanning speed

激光功率较小时,激光能量密度较低,熔池的尺

寸较小。通常情况下,熔池的尺寸决定了激光熔覆道之间与层间的冶金结合能力,因此激光功率过小会造成层间熔合不良等缺陷产生(图4),从而降低成形件的致密度。当激光功率达到 325 W 时,SLM 成形试块的致密度可达 99.5%以上。

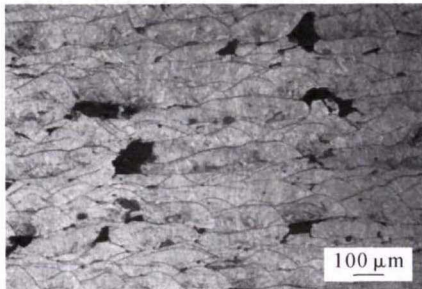


图4 典型的熔合不良缺陷
Fig.4 Typical fusion defects

扫描速度对致密度的影响与激光功率类似。随着激光扫描速度的增加,SLM 成形熔池冷却速度快,激光作用于粉末的时间短,不能完全熔化粉末,熔池易形成的孔隙缺陷。扫描速度过低时,SLM 成形过程激光能量输入过高,熔池局部温度会超过不锈钢的蒸发点,部分蒸发气体在凝固时未及时排出而残留在内部形成小孔,如图5所示。当扫描速度为 1 000~1 200 mm/s 时,SLM 成形试块的致密度较高。

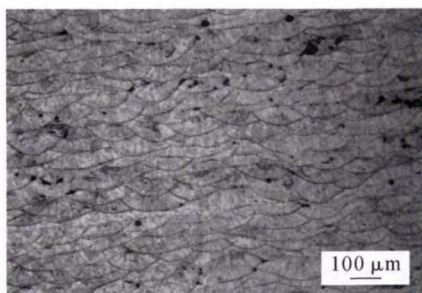


图5 典型的气孔缺陷
Fig.5 Typical porosity defects

2.3 扫描间距对致密度的影响

扫描间距直接影响激光扫描线之间的搭接率。在 SLM 成形过程中,相邻的激光熔覆道之间不可避免地会出现凹坑,如图6所示。设熔道宽度用 W

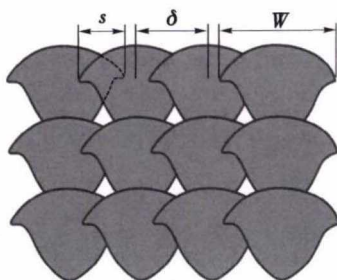


图6 扫描线搭接示意图

Fig.6 The principle diagram of scanning line overlapping

表示,扫描间距用 δ 表示,搭接长度用 s 表示,理论搭接率 ϕ 为:

$$\phi = \frac{s}{W} = \frac{W - \delta}{W} = \left(1 - \frac{\delta}{W}\right) 100\% \quad (1)$$

由式(1)可见,凹坑随着扫描间距 δ 的减小而变小。通常情况下,粉末在激光的作用下熔化为金属液体,液体在重力及表面张力作用下填充凹坑,相邻熔覆道之间结合紧密。但是当扫描间距 δ 较大时,搭接率减小,凹坑变大;由于 SLM 成形是快速熔化—凝固的过程,金属液无法完全填充凹坑,出现孔洞现象,造成致密度下降。

扫描间距 δ 越小,搭接率越高,成形致密度越高。扫描间距并非越小越好。扫描间距过小时,会成形表面形貌呈现过熔状态,造成成形表面粗糙度过大,且成形效率低。通过试验综合分析,选用扫描间距为 0.12 mm,成形件质量较好。

2.4 工艺优化

在上述研究基础上,开展 1Cr18Ni9Ti 不锈钢粉末的工艺优化研究,对比不同工艺参数对致密度的影响。在激光功率 325~340 W、扫描速度 1 000~1 200 mm/s、扫描间距 0.12 mm 的工艺参数下,可成形出致密高于 99.9%的零件,成形件金相显微组织如图7所示。

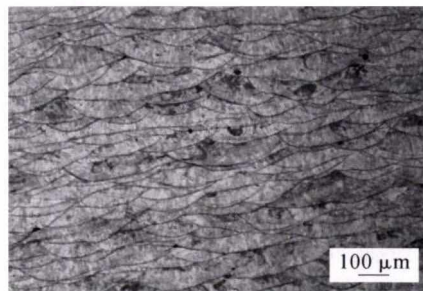


图7 工艺参数优化后 SLM 成形 1Cr18Ni9Ti 试样的微观组织

Fig.7 The microstructure of 1Cr18Ni9Ti formed using the optimized SLM process parameters

2.5 力学性能

采用 325 W、1 100 mm/s、扫描间距 0.12 mm 的成形参数制作拉伸试棒,纵向试样和横向试样各 3 根。SLM 成形的 1Cr18Ni9Ti 试棒拉伸性能如表4所示,可以看出 SLM 成形的试棒力学性能满足 QJ501A-98 标准要求。其中抗拉强度 R_m 和规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 优异,抗拉强度 R_m 比 QJ501A-98 标准要求大 30%左右,规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 是标准要求的 2.5 倍左右。

3 结论

(1)粉末熔化的能量输入密度主要取决于激

表 4 SLM 成形 1Cr18Ni9Ti 合金试棒力学性能
Tab.4 The tensile properties of 1Cr18Ni9Ti alloy samples
by SLM

试样类型	抗拉强度 R_m /MPa	规定塑性延伸 强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率 A (%)
横向	728	574	43.5
	719	547	44.5
	726	564	41.0
纵向	709	571	42.0
	718	563	42.5
	714	578	41.5
QJ501A-98	≥ 540	≥ 196	≥ 40

光功率和扫描速度。在不同扫描速度下,致密度随着激光功率的增大而提高。扫描间距直接影响激光扫描线之间的搭接率;扫描间距较小时,激光熔覆道的搭接率高,成形件致密度较高;扫描间距过小时,成形表面形貌会呈现过熔状态。

(2)在激光功率 325~340 W、扫描速度 1 000~1 200 mm/s、扫描间距 0.12 mm 的工艺参数下,SLM 技术可成形出致密高于 99.9%的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢零件。

(3)采用优化后的 SLM 工艺参数成形

1Cr18Ni9Ti 不锈钢试棒的力学性能优于 QJ501A-98 标准,抗拉强度 $R_m \geq 709$ MPa,规定塑性延伸强度 $R_{p0.2} \geq 547$ MPa,断后伸长率 $A \geq 41\%$ 。

参考文献:

- [1] 袁学兵,魏青松. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末研究[J]. 热加工工艺,2014,43(4):91-94.
- [2] 丁利,李怀学,王玉岱,等. 热处理对激光选区熔化成形 316 不锈钢组织与拉伸性能的影响[J]. 中国激光,2015(4):1-7.
- [3] 李晓琳,淡婷,邓丽芬,等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢球头表面腐蚀原因分析[J]. 失效分析与预防,2014,10(5):271-274.
- [4] Guan K, Wang Z, Gao M, et al. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel[J]. Mater. Des., 2013, 50: 581-590.
- [5] 靖冠乙,魏恺文,王泽敏,等. 激光选区熔化成形 S-04 钢的组织及性能[J]. 激光与光电子学进展,2016(11): 213-220.
- [6] Averyanova M, Bertrand P, Verquin B. Studying the influence of initial powder characteristics on the properties of final parts manufactured by the selective laser melting technology [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2011, 6(4): 1-9.
- [7] 陈洪宇,顾冬冬,顾荣海,等. 5CrNi4Mo 模具钢选区激光熔化增材制造组织演变及力学性能研究[J]. 中国激光,2016(2): 60-67.
- [8] 梅国宏,张庆军,朱立光,等. 脉冲磁场细化钢材凝固组织的研究进展[J]. 铸造技术,2018,39(7):2628-2631.
- [9] 翟启杰,龚永勇,高玉来,等. 磁致振荡细化金属凝固组织的方法及其装置:中国, ZL200510030736.4[P]. 2005-10-27.
- [10] Gong Y Y, Luo J, Jing J X, et al. Structure refinement of pure aluminum by pulse magneto-oscillation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008,497(1-2):147-152.
- [11] Pei N, Gong Y Y, Li R X. Mechanism of pulse magneto-oscillation grain refinement on pure Al[J]. China Foundry, 2011,8(1): 47-50.
- [12] 陈国军,张永杰,杨院生,等. 任意波形脉冲磁场下电磁力计算模型研究[J]. 金属功能材料,2014,21(3):19-24.
- [13] 李桂东,麻永林,邢淑清,等. 连铸结晶器方波电流电磁搅拌电磁场-流场数值模拟[J]. 铸造技术,2019,40(4):276-282.
- [14] 王亚非,贾华,袁日栋. 电磁搅拌器磁场形态研究及选择[J]. 铸造技术,2018,39(7):1549-1553.
- [15] 刘芳,张璐云. 脉冲磁致振荡下纯铝凝固磁场与流场分布的数值模拟[J]. 铸造,2012,61(3):285-290.
- [16] 程誉峰. 脉冲磁致液面振荡作用下电磁场、流场及温度场的有限元分析[D]. 上海:上海大学,2013.
- [17] Zhao J, Cheng Y F, Han K, et al. Numerical and Experimental studies of surface-pulsed magneto-oscillation on solidification [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229:286-293.
- [18] Zhao J, Yu J H, Han K, et al. Improving the Solidified Structure by Optimization of Coil Configuration in Pulsed Magneto-Oscillation [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 31(12): 1334-1344.
- [19] 郝军利,赵静,仲红刚,等. PMO 作用下连铸二冷区电磁场-流场-温度场的数值模拟研究 [J]. 上海大学学报,2018,24(3): 412-421.
- [20] Yuhshiohara M N, Nakada M, Flemings M. Modification of Solidification Structures by Pulse Electric Discharging [J]. ISIJ International, 1990, 30(1):27-33.
- [21] 班春燕,崔建忠,巴启先,等. 脉冲电流对 Al 及 Al-5.3%Zn 合金宏观组织的影响[J]. 铸造技术,2004,25(4):238-239.
- [22] Liao X L, Zhai Q J, Luo J et al. Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum[J]. Acta Materialia, 2007,55(9): 3103-3109.
- [23] Li B, Yin Z X, Gong Y, et al. Effect of temperature field on solidification structure of pure Al under pulse magneto-oscillation [J]. China Foundry, 2011,8(2): 172-176.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2020 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64

国外发行号:M855

国内定价:25 元/本

海外定价:25 美元/本