



激光与光电子学进展
Laser & Optoelectronics Progress
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目：不同粒径粉末搭配对激光选区熔化 IN738 合金成形件表面粗糙度及内部缺陷的影响

作者：胡勇，杨小康，康文江，丁雨田，许佳玉，张会莹

收稿日期：2020-05-09

网络首发日期：2020-06-24

引用格式：胡勇，杨小康，康文江，丁雨田，许佳玉，张会莹. 不同粒径粉末搭配对激光选区熔化 IN738 合金成形件表面粗糙度及内部缺陷的影响[J/OL]. 激光与光电子学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200623.1440.018.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

不同粒径粉末搭配对激光选区熔化 IN738 合金成形件表面粗糙度及内部缺陷的影响

胡勇^{1,2*}, 杨小康^{1,2}, 康文江^{1,2}, 丁雨田^{1,2}, 许佳玉^{1,2}, 张会莹^{1,2}

¹兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050;

²兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050

摘要 不同粒径粉末搭配对激光选区熔化成形件的质量起着至关重要的作用。本文系统研究了 IN738 合金不同粒径粉末搭配对粉末特性和成形件质量的影响, 结果表明: 成形粉末流动性随着粗粒径粉末体积分数的增加而增加, 当粗细粉末 (50%粒径为 31-53 μm 粗粉和 50%粒径为 15-30 μm 的细粉) 相互搭配时, 其粒径分布为 (D10 为 15.1 μm 、D50 为 27.9 μm 、D90 为 52.9 μm), 成形粉末具有较高的松装密度和振实密度, 成形件具有较好的表面粗糙度及较低的孔隙率和裂纹密度, 致密度达到 99.3%。研究发现, 不同粒径粉末搭配制备的打印件裂纹为凝固裂纹, 裂纹主要沿着外延生长的<001>取向柱状晶晶界分布并扩展。

关键词 粉末粒径; 激光选区熔化; 表面粗糙度; 致密度; 内部缺陷

中图分类号 TN249 TF122 **文献标志码** A

Effects of the combination of powders with different particle sizes on the surface roughness and internal defects of IN738 alloy formed by selective laser melting

Hu Yong^{1,2*}, Yang Xiaokang^{1,2}, Kang Wenjiang^{1,2}, Ding Yutian^{1,2}, Xu Jiayu^{1,2},
Zhang Huiying^{1,2}

¹School of Material Science and Engineering, Lanzhou University of Technology,
Lanzhou 730050, Gansu, China

²State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China

Abstract The combination of powders with different particle sizes plays a vital role in the quality of samples formed by selective laser melting. In this paper, the effect of IN738 alloy with different particle size powders on the powder characteristics and the quality of the shaped parts have been systematically studied. The results show that the powder fluidity increases with the increase of the volume fraction of the large particle size powder. When powders with large and small particle sizes (50% particle size of 31-53 μm and particle size of 15-30 μm) are matched with each other, the particle size distribution shows that D10 is 15.1 μm , D50 is 27.9 μm and D90 is 52.9 μm , the apparent density and tap density of the powder are higher and the density of shaped part reaches 99.3%, with the better surface roughness and the lower porosity and crack density. The study exhibits that the cracks of the printed parts are solidification cracks, and the cracks are mainly distributed and propagated along the epitaxially grown <001> oriented columnar grain boundaries.

基金项目: 甘肃省科技重大专项(17ZD2GC001)、兰州理工大学红柳一流学科建设基金

*E-mail: luthuyong@outlook.com

Key words Powder particle size; Selective laser melting; Surface roughness; Density; Internal defects

OCIS codes 140.3390; 160.3390; 350.3390

1 引言

激光选区熔化技术 (Selective laser melting, SLM) 因其具有能够自动、快速、准确的将数字模型直接或间接的转化成有一定功能零件的特点, 而在全球得到迅速的发展^[1]。长期以来, 研究人员在探讨 SLM 工艺参数对成形件质量的影响及优化成形件的后处理工艺参数等方面做了大量的工作^[2,3]。Carter^[4]和 Catchpole^[5]等研究了扫描策略与裂纹的形成和分布之间的关系, 并通过改变激光扫描策略降低了裂纹密度, 提高了 CM247LC 成形件的致密度; Nataliya P 等^[6]使用 Doehlert 设计, 经过 14 次实验, 优化了 IN738LC 合金 SLM 成形参数, 成形出致密度接近 100 % 且无裂纹的 IN738LC 合金试样; Wang H 等^[7]在 IN738LC 合金的 SLM 成形中, 通过前期粉末筛分处理及工艺参数优化, 成功打印出几乎完全致密的合金试样, 经过后期的热等静压和双重时效热处理, 试样具有优良的强度和延展性。

研究表明, SLM 成形零件的性能不仅与打印工艺参数有关, 而且与原材料粉末特性密切相关^[8,9], 粉末的特性主要包括粉末成分、粉末形态、粉末氧含量等, 其中由不同粒径粉末搭配所造成的成形粉末的粒径分布、松装密度、流动性等对于 SLM 加工过程及成形零件的性能有很大的影响^[10-12]。Nguyen 等^[13]研究了镍铬铁合金的原始粉末和循环使用 10 次后回收粉末的 SLM 成形性能, 结果表明适合 SLM 工艺的粒径分布范围为 15-63 μm , 原始粉末相较于回收粉末具有更好的流动性, 但二者成形零件均具有良好的力学性能; 魏青松等^[14]对比了不同粒径分布的 316L 不锈钢 SLM 成形件, 研究发现, 粉末粒径越小, 成形件致密度越高, 但粒径过小时, 粉末颗粒容易发生团聚, 使得粉末流动性变差, 反而影响成形质量; Spierings 等^[15]通过对不同粒径的 316L 不锈钢粉末成形件研究发现, 粉末粒度分布越窄、松装密度越高, 成形时球化现象越少, 且成形件致密度和表面质量更好; GU 等^[16]研究了粉末粒径分布对 SLM 成形 Ti-6Al-4V 合金性能的影响, 结果表明, 在相同范围内粒径分布具有双峰特征金属粉末, 成形件具有较高的致密度和力学性能; 王黎等^[17]研究了 316L 不锈钢粉末粒径和松装密度对成型性能的影响, 发现在一定范围内, 粉末粒径越小, 成形过程中颗粒飞溅现象越少, 熔池越稳定, 成形件表面粗糙度越小, 而粒度分布较宽的粉末在成形时容易发生球化现象。此外, 粉末松装密度越高, 成形件致密度越大。

IN738 合金是一种沉淀强化型镍基高温合金, 其工作温度约为 980 $^{\circ}\text{C}$ ^[18]。由于该合金具

有优异的高温蠕变性能和耐热腐蚀性能而被广泛应用于航空发动机、燃气轮机等热端部件^[19]。虽然采用 SLM 技术成形这类复杂结构零件具有独特优势，但是相较于其他镍基高温合金而言，IN738 合金化学成分更加复杂，Al、Ti 含量更高（约 6.8%），具有较高的裂纹敏感性而被称为“难焊合金”^[20-23]。目前对于 SLM 成形 IN738 合金的工艺优化及缺陷控制已有广泛研究^[24-27]，但高品质的 SLM 用 IN738 合金粉末的选择和评定标准还有待完善，特别是有关于不同粒径粉末搭配对于成形粉末特性及打印件质量影响的相关研究还很欠缺。因此，本论文系统研究了同批次不同粒度粉末搭配形成成形粉末的物理特性及其对成形件致密度、表面粗糙度及内部缺陷的影响。研究工作将为后续制备高质量、全致密的打印件，原材料的选择和制定 SLM 技术用粉末标准提供参考依据。

2 试验材料与方法

试验原材料为通过雾化技术制备的商用 IN738 合金粉末。为了保持粉末特性（包括粉末的形态和成分）的一致性，选用同一批粉末预先筛分成细粉（粒径 15-30 μm ）和粗粉（粒径 30-53 μm ），随后将粗细粉末按照一定的比例进行充分混合，并进行编号。成形粉末具体如下：1#为 100% 的粒径为 15-30 μm 的细粉、2#由 50% 粒径为 15-30 μm 的细粉和 50% 粒径为 31-53 μm 粗粉均匀混合所得、3#为 100% 粒径为 31-53 μm 的粗粉。采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪对粉末进行粒度检测分析；采用 FT-102B 型自动金属粉末流动性测试仪测定粉末流动性；采用 MZ-102 型金属粉末松装密度测试仪和 BT-303 型金属粉末振实密度测试仪检测 IN738 金属粉末松装密度与振实密度；采用 Quanta 450 FEG 场发射扫描电镜观察粉末颗粒形状。成形前将所有编号粉末在 150 $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥 4h 后备用。

采用 EOS 公司 INT M280 型 SLM 成形设备完成试块制备。具体打印参数如下：粉末层厚 0.04 mm、激光功率 270 W、扫描速度 1150 mm/s、扫描间距 0.09 mm，采用 316L 不锈钢基板并预热至 100 $^{\circ}\text{C}$ ，激光扫描策略如图 1 所示。不同编号的粉末在氩气气氛中成形 5 个尺寸为 10 mm \times 10 mm \times 10 mm 的立方体试块以供检测表征。

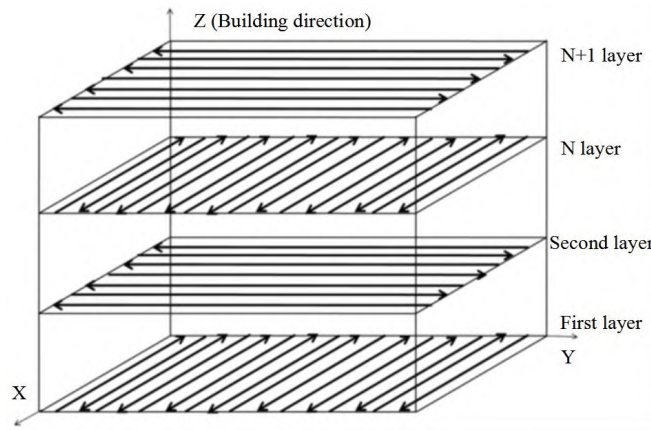


图1 S型正交扫描策略示意图

Fig. 1 Schematic diagram of S-type orthogonal scanning strategy

采用蔡司 LSM 800 型激光扫描共聚焦显微镜对试样上表面以及侧表面粗糙度进行测量，每个试样测量三次并取平均值；采用 DH-200M 型高精度密度测试仪检测 SLM 成形件密度；对抛光的试样截面选取五张相同倍数的光学显微照片，采用 Image pro plus 分析计算每张图片中孔洞面积占该图片面积的百分比并求其平均值得到孔隙率；对抛光的 XOY 面和 XOZ 面分别选取五张相同倍数的光学显微照片，采用 Image pro plus 分析计算每张图片中裂纹面积占该图片面积的百分比并求其平均值得到裂纹密度；采用 Quanta 450 FEG 场发射扫描电镜及电子背散射衍射(EBSD)对试样微观组织及晶粒取向进行表征分析。

3 试验结果与讨论

3.1 不同粒度粉末搭配对粉末特性的影响

同一生产批次的合金粉未经筛分后以不同比例混合将得到三种不同粒径分布的粉末，三种粉末的化学成分维持一致（如表 1 所示）。由表 1 可以看出，实验用 IN738 合金粉末化学成分符合标准，并且粉末中 O 含量 (0.014 wt. %)、N 含量 (0.0039 wt. %)、H 含量 (0.0007 wt. %) 均符合航天航空领域对 3D 打印用高温合金粉末的元素含量要求 (<0.02 wt. %)，因此三种粉末化学性质对成形性能的影响可忽略不计。

表 1 IN738 合金粉末元素含量 (wt. %)

Table 1 IN738 alloy powder element content (wt. %)

Element	Ni	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti
Standard	Bal.	0.1-0.2	15.7-16.3	8.0-9.0	2.4-2.8	1.5-2.0	3.2-3.7	3.0-3.5
Powder	Bal.	0.12	15.73	8.24	2.68	1.88	3.47	3.18
Element	Fe	Zr	Ta	B	Nb	Si	Mn	P
Standard	≤0.5	0.05-0.15	1.5-2.0	0.005-0.015	0.6-1.1	≤0.3	≤0.2	≤0.015
Powder	0.084	0.12	1.80	0.0089	0.91	0.04	≤0.01	≤0.005
Element	S	Pb	Sb	As	Sn	N	O	H
Standard	≤0.015	≤0.001	≤0.001	≤0.005	≤0.002	—	—	—
Powder	≤0.002	≤0.001	≤0.001	≤0.001	≤0.001	0.0039	0.014	0.0007

图 2 为三种粉末颗粒的整体形貌 (图 a、b、c) 及粒度分布曲线 (图 d、e、f)。如图 2 (a) (b) (c) 所示, 三种粉末形态相似且多为球形或准球形, 有少量不规则形状及卫星球。其中 1#粉末颗粒球形度最好, 颗粒表面平整光滑, 但由于粉末粒度较小且单一, 团聚现象较为严重。3#粉末粒径较大并且表面粗糙。2#粉末由表面光滑的细粉和表面粗糙的粗粉混合构成。图 2 (d) (e) (f) 所示为 1#、2#、3#IN738 合金粉末的粒度分布图, 图中曲线分别表示粒度频率分布和粒度累积分布。由图中可以看出三种粉末粒度都呈单峰正态分布, 其中 1#粉末粒径范围为 13.8-26.9 μm ; 2#粉末粒径范围为 20.5-40.3 μm ; 3#粉末粒径范围为 30.5-60.5 μm 。

表 2 所示为不同粒度 IN738 合金粉末混合后的成形粉末的粒度分布特征量和物理性能。由表 2 可以看出, 三种粉末中 3#粉末与 1#、2#粉末相比具有更好的流动性。这是因为 3#粉末比 1#、2#粉末粒径更大, 粉末比表面积更小, 受颗粒间作用力 (例如范德华力) 的影响较小。1#粉末粒径在 13.8-26.9 μm 范围内, 粉末粒径过小, 容易发生粘连、团簇, 严重降低粉末的流动性, 在测量流动性的过程中易发生断流现象, 故采用安息角来表征流动性, 安息角越大粉末流动性越差, 实验测得 1#粉末安息角为 39.9°。由于 1#粉末粒径太小且分布单一, 因而导致其松装密度和振实密度最小。粗细粉末混合搭配所得的 2#粉末比 1#、3#粉末的实测松装密度和振实密度高。3#粉末以粗粉末颗粒为主, 粉末粒径单一, 相比于 2#粉末, 细粉末颗粒不能充分地填充粗粉末颗粒之间的空隙, 造成粉末堆积密度较小, 不利于 SLM 成形。

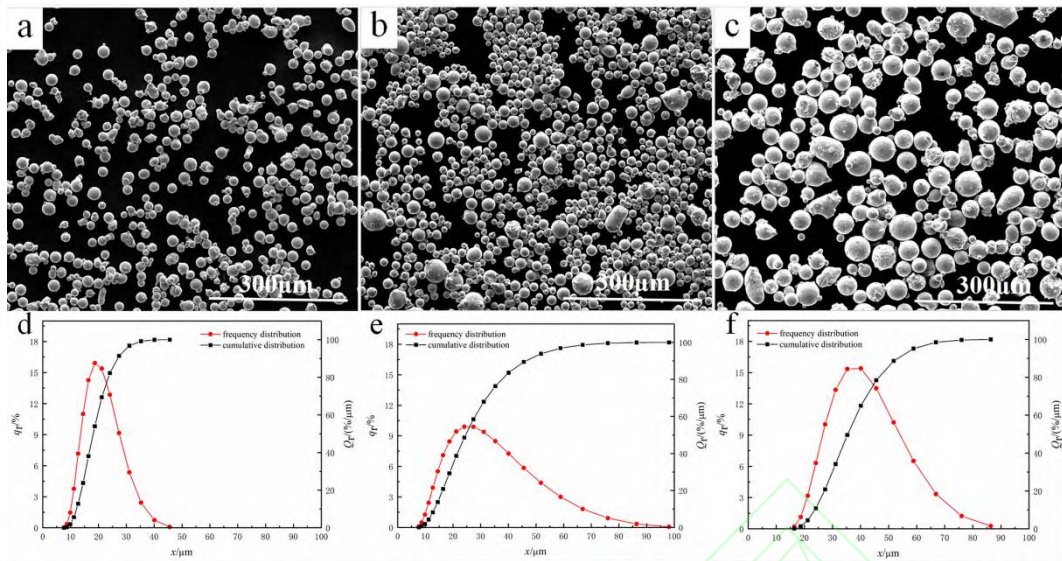


图2 不同粒径分布的 IN738 合金粉末形貌和粒度分布图。(a) (b) (c) 1#粉末、2#粉末、3#粉末颗粒形貌；(d) (e) (f) 1#粉末、2#粉末、3#粉末粒度分布图

Fig. 2 The morphology and particle size distribution of IN738 alloy powder with different particle sizes. (A) (b) (c) 1 # powder, 2 # powder, 3 # powder particle morphology; (d) (e) (f) 1 # powder, 2 # powder, 3 # powder particle size distribution

表 2 IN738 合金粉末粒度分布特征量和物理性能

Table 2 IN738 alloy powder particle size distribution characteristics and physical properties

Powder properties	1#	2#	3#
D10 (μm)	13.8	15.1	26.9
D50 (μm)	20.5	27.9	40.3
D90 (μm)	30.5	52.9	60.5
Fluidity (s/50g)	—	19.0	14.0
Apparent density (g/cm^3)	3.99	4.15	4.08
Tap density (g/cm^3)	4.85	4.96	4.94

3.2 不同粒度粉末搭配对成形件表面粗糙度和致密度的影响

图3 为不同粒度粉末搭配打印成形件的表面粗糙度和致密度，其中柱状图表示成形件 XOY 面和 XOZ 面表面粗糙度，折线图表示成形件致密度。由图3 柱状图可以看出，1#、3# 粉末成形件表面较为粗糙，XOY 面粗糙度值分别为 $7.30 \mu\text{m}$ 和 $6.90 \mu\text{m}$ ，XOZ 面粗糙度值分别为 $12.89 \mu\text{m}$ 和 $13.07 \mu\text{m}$ ，2#粉末成形件表面质量最好，XOY 面粗糙度值为 $4.47 \mu\text{m}$ ，XOZ 面粗糙度值为 $8.10 \mu\text{m}$ 。这主要是因为 1#粉末颗粒粒径偏小，粉末流动性差，铺粉过程中无法形成均匀致密的粉末薄层，成形过程中的飞溅球化现象较多。3#粉末虽然流动性最好，但大粉末颗粒之间空隙较大，成形过程中易形成孔隙。由于 1#和 3#粉末均由单一粒度

的粗细粉末组成, 因而其松装密度和振实密度都较小, 其粉末粒径的单一性对成形件表面粗糙度影响较大。相较而言, 2#粉末由粗细两种粒径的粉末等比例混合而成, 表现出良好的综合性能, 铺粉均匀密实, 粉末在激光的照射下几乎全部融化, 产生稳定且连续的凝固线条, 由线到面, 由面到体, 最后得到表面粗糙度较小的成形件。

虽然三种粉末的 XOZ 面粗糙度值和 XOY 面粗糙度值具有相同的变化趋势, 但很明显, XOZ 面比 XOY 面粗糙度值高。图 4 为 2#粉末成形件 XOY 面 (图 a) 和 XOZ 面 (图 b) 表面形貌。成形过程中, 每一层边缘处的熔池直接与未成形的粉末相接触, 受激光能量呈高斯分布的影响, 熔池边缘处粉末未能完全熔化且不会再进行二次重熔, 每一层边缘处的未熔颗粒、半熔颗粒以及粘附颗粒层层叠加, 如图 4 (b) 中白色箭头所示, 使得成形件 XOZ 面质量相对较差。而 XOY 面除了球化及飞溅现象的产生外 (如图 4 a 中白色箭头所示区域), 在整个扫描过程中很少有未成形粉末的干扰, 熔池充分流动铺展, 整个成形表面较为平整, 因此, XOY 面粗糙度要比 XOZ 面粗糙度小。

由图 3 折线图可以看出, 1#、3#成形件致密度较低 (分别为 98.6 %和 98.2 %), 2#成形件致密度最高为 99.3 %。这主要是由于 1#粉末颗粒粒径较小, 铺粉一致性较差, 易产生空隙, 因此严重影响了成形件致密度。同时小粉末颗粒的比表面积较大, 能够吸收足够的能量使其完全熔化, 并且还会将周围金属粉末吸附到熔池内, 当激光照射下一点时, 由于熔化的粉末量不足, 因而在熔道形成凹坑。此外, 被吸附的粉末会造成局部液相过多, 金属熔液在表面张力的作用下发生球化现象, 这都会影响熔道之间、凝固层之间的结合性, 进而产生孔隙和裂纹, 致使成形件致密度下降。3#粉末由于其粒径较大且粒径分布单一, 铺粉过程中颗粒之间存在较多空隙, 成形过程中产生的孔隙导致其致密度较小。2#粉末粗细相互搭配, 流动性和松装密度高, 铺粉过程平整、均匀且密实, 激光扫描形成的熔道完整连续, 层与层之间结合性良好, 因而其成形件致密度较高。李瑞迪等^[28]从实际铺粉厚度的角度证实了松装密度高的粉末 SLM 成形件致密度高, 并得出实际粉层厚度 H_{\max} 与设定铺粉厚度 h 之间的关系式:

$$H_{\max} = h\rho_m / \rho_l \quad (1)$$

其中: ρ_m 为金属实体的标准密度, ρ_l 为粉末松装密度。由关系式可知松装密度越高, 实际粉层厚度就越小, 故而成形过程粉末层与基体之间有良好的润湿性 (实际粉层薄有利于润湿性), 可以获得致密度较高的 SLM 成形件。

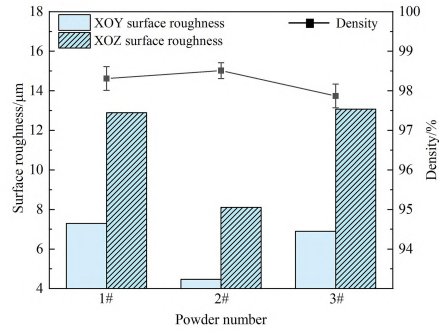


图 3 SLM 成形件的表面粗糙度和致密度

Fig. 3 Surface roughness and density of SLM formed parts

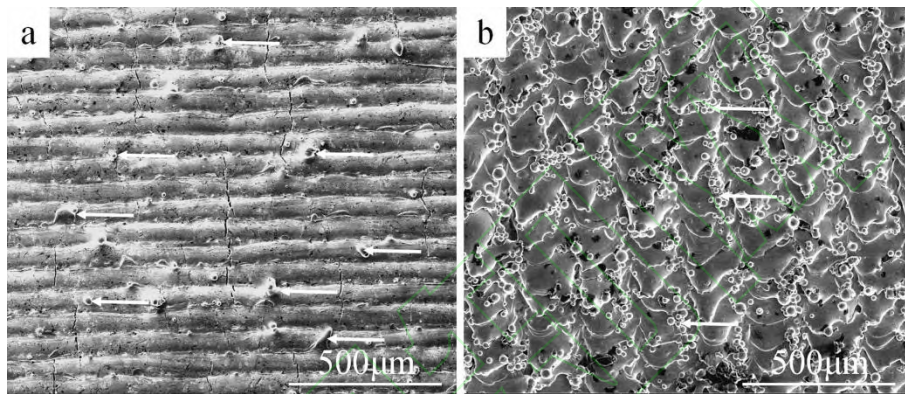


图 4 2#粉末 SLM 成形件表面形貌。(a) XOY 面；(b) XOZ 面

Fig. 4 Surface morphology of 2 # powder SLM forming parts. (a) XOY surface; (b) XOZ surface

3.3 不同粒度粉末搭配对孔隙率和裂纹密度的影响

图 5 为三种粉末成形件的孔隙率和裂纹密度分布图，其中柱状图表示成形件 XOY 面和 XOZ 面裂纹密度，折线图表示成形件孔隙率。由图 5 折线图可以看出，2#成形件孔隙率最小为 2.33%，而 1#、3#粉末成形件孔隙率较大，分别为 3.62% 和 4.13%。这种成形质量的差异主要由不同粒径粉末搭配造成粉末粒径分布的差异所导致。图 5 柱状图显示了三种粉末 XOY 面和 XOZ 面裂纹密度，采用相同参数成形的三种粉末的内部裂纹密度分布规律与孔隙率有相同的变化趋势，当粉末粒径分布单一时，其内部裂纹密度较高。2#粉末成形件裂纹密度最低，分别为 XOY 面 1.23%、XOZ 面 1.87%，主要因为 2#粉末振实密度最高，铺粉过程中可以形成良好致密的粉体薄层，激光扫描成形后形成连续光滑并且稳定的熔池，球化及飞溅颗粒最少，孔隙较少，因而成形件内部裂纹数量也相应减少。图 6 为不同粒径粉末铺粉的示意图，其中图 6 (a) 为粗细粉末搭配均匀的混合粉末铺粉示意图，与 2#粉末相似，粗细混合粉末粒径分布较宽，流动性好，各种粒径粉末颗粒相互配合，大粉末颗粒之间的空隙被小粉末颗粒充分填补，使得铺粉过程均匀且密实，因而成形质量高。图 6 (b) 为粒径分

布单一的粉末铺粉示意图，与1#或3#粉末类似。在相同的工艺参数下，较细的粉末在激光作用下易于熔化，甚至会产生过烧等现象，使得形成的熔池极不稳定，熔滴飞溅等现象加剧，这对后续铺粉的质量会产生影响。而较粗的粉末在激光作用下，粉末床的空隙较多，不致密，形成的熔池非连续，并且熔池内容易卷气，同时，由于存在未熔化的粉末，这进一步导致了成形件不致密，孔隙率大。

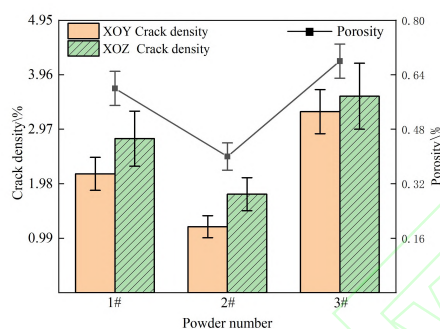


图 5 不同粒径粉末制备的 SLM 成形件的孔隙率和裂纹密度

Fig. 5 Porosity and crack density of SLM shaped parts prepared with powders of different particle sizes

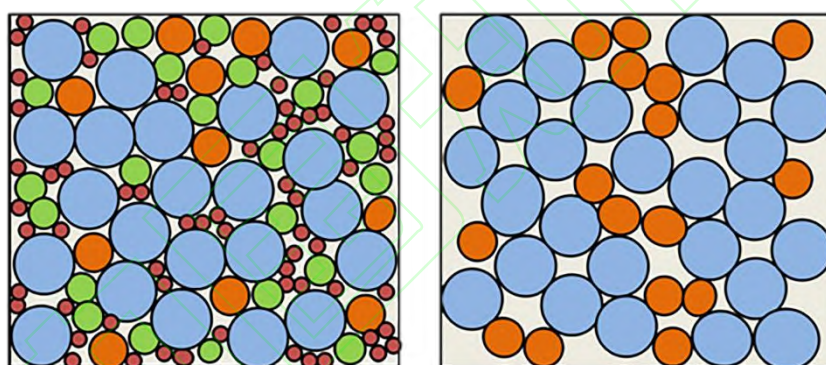


图 6 不同粒径粉末铺粉的示意图。(a) 粉末粒径配比均匀；(b) 粉末粒径单一

Fig. 6 Schematic diagram of powder spreading with different particle sizes. (a) The powder particle size ratio is uniform; (b) The powder particle size is single

3.4 成形件内部组织及裂纹形态

图 7 为 2#粉末成形件 XOY 和 XOZ 面的反极图 (IPF) 面分布图，图中展现了 SLM 成形过程中晶粒的生长状况。由图 7 (a) 可以看出，在 XOY 面由不同取向的晶粒形成典型的棋盘格状形貌，棋盘格边缘对应明显的<001>取向晶粒，方格内为<101>或<111>取向，并且裂纹分布在不同取向晶粒的晶界位置。在 XOZ 面，可以看出沿着成形方向分布的长条状<001>取向晶粒，该取向的晶粒贯穿整个平面，长条状晶粒两边更宽的区域趋向<111>和<101>。

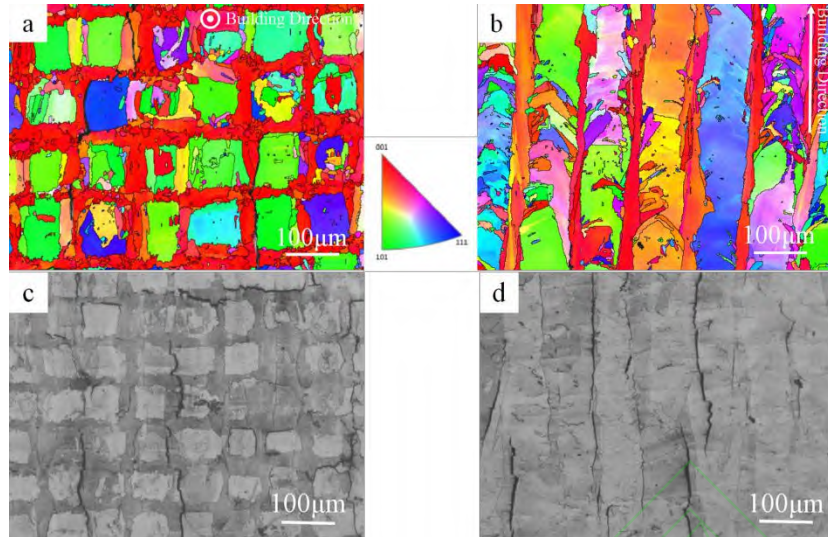


图 7.2 #粉末 SLM 成形件 XOY、XOZ 面反极图 (IPF) 晶粒结构图及显微组织。(a) XOY 面 IPF; (b) XOZ 面; (c) XOY 面微观形貌; (d) XOZ 面微观形貌

Fig. 7.2 # powder SLM formed parts XOY, XOZ plane inverse pole figure (IPF) grain structure diagram and microstructure. (a) XOY plane IPF; (b) XOZ plane; (c) XOY plane microtopography; (d) XOZ plane microtopography

根据熔池内部组织及晶粒生长方向，建立单熔池内部组织生长模型如图 8 所示。由图 8 可以看出采用 90° 扫描策略，熔池的不同位置在 XOY 面和 XOZ 面取样后所呈现的晶粒组织。图 8 (a) 为图 8 (f) 所对应的 XOZ 面箭头所指区域的单个熔池模型，由熔池中心明显可以看出沿着成形方向生长的柱晶区域，熔池周围区域柱晶生长方向与中心区域不同，但都朝向熔池中心生长^[29, 30]，图中箭头所指不同区域体现出的衬度差别是由于晶粒取向的不同所产生。当中心区域的柱状晶与边缘柱状晶相互接触时，柱晶停止生长，接触区域的液态金属为凝固的末端，在其固液界面前沿的残余液相中，一些难溶元素会产生富集，最终形成低熔点液膜，形成裂纹敏感区域，这种在熔池中心位置形成的裂纹被证实为凝固裂纹^[31, 32]。XOZ 面平行于 X 轴方向的熔道在取样打磨的过程中将熔池沿着激光扫描方向切割，当切割的位置如图 8 (d) 所示时，则熔池横截面呈现胞状晶组织，当切割位置正好为熔池中心时，则可以看到外延生长的柱晶延伸到下一层。由于 SLM 层层叠加的制造方法，如图 7 (b) 中红色 $\langle 001 \rangle$ 取向的柱晶可以延伸多层。图 8 (b)、(c) 为图 8 (a) 单个熔池模型的俯视图，分别对于图 8 (e) XOY 平面中箭头所指区域，由图中可以看出，XOY 面的胞状晶为所对应的柱晶横截面，结合图 7 (a) (b) 反极图显示结果，红色 $\langle 001 \rangle$ 取向的柱晶对应熔池中心，棋盘格状组织是由于激光层层扫描叠加的效果，而裂纹沿着熔池中心的 $\langle 001 \rangle$ 取向柱状晶晶界萌生并扩展。

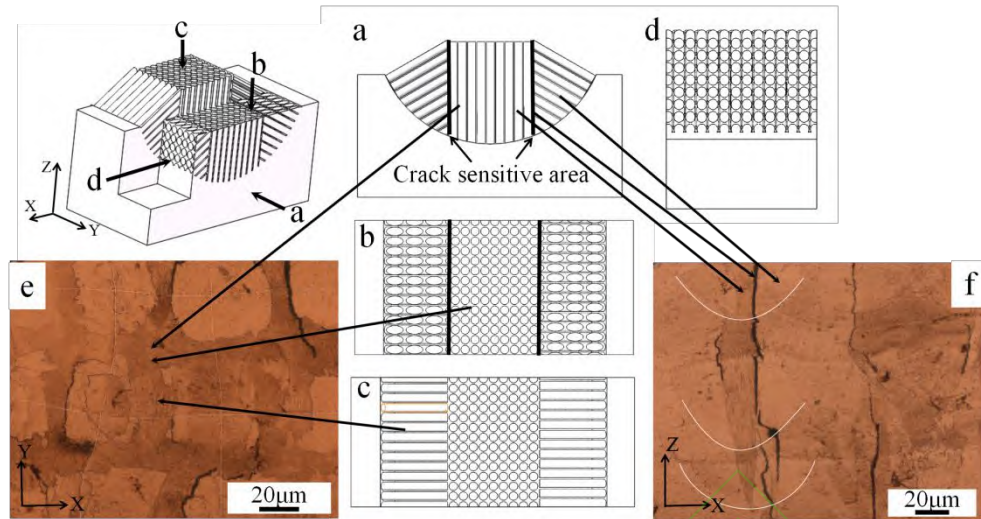


图 8 XOY 面 XOZ 面熔池组织模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the molten pool organization model on the XOY surface and XOZ surface

4 结论

不同粒度粉末搭配是决定成形粉末物性参数及影响成形件性能的至关重要因素。本研究通过对三种不同搭配比例成形粉末的粉末特性、成形件表面质量及内部缺陷研究发现：

当粉末为百分之百粗粉或细粉时，松装密度和振实密度较小，但粗粉的流动性最好，细粉流动性最差；单一粗粉或细粉所对应的打印成形件的表面粗糙度及内部缺陷相较于粗细颗粒搭配的粉末差；粗细粉末颗粒相互搭配时，流动性和松装密度都较好，成形件表面粗糙度最小，致密度可以达到 99.3%，内部孔隙密度和裂纹密度相应最小。IN738 合金 SLM 成形件内部的裂纹主要为凝固裂纹，分布在熔池中心，裂纹沿着外延生长的<001>取向的柱状晶晶界扩展。

参考文献

- [1]Gu D D, Meiners W, Wissenbach K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms[J]. International materials reviews, 2012, 57(3): 133-164.
- [2]Ma Y Y, Liu Y D, Shi W T, et al. Effect of scanning speed on forming defects and properties of selective laser melted 316L stainless steel powder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101403.
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): 101403.
- [3]Wan L, Wang S Q, Zhang X W, et al. Forming quality of titanium alloys by selective laser melting based on partition scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(09):

091401.

万乐, 王思琦, 张晓伟, 等. 基于分区扫描的选区激光熔化钛合金的成形质量[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(09): 091401.

[4]Carter L N, Martin C, Withers P J, et al. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: 338-347.

[5]Catchpole-Smith S, Aboulkhair N, Parry L, et al. Fractal Scan Strategies for Selective Laser Melting of 'Unweldable' Nickel Superalloys[J]. Additive Manufacturing, 2017: S221486041630358X.

[6]Perevoshchikova N, Rigaud J, Sha Y, et al. Optimisation of selective laser melting parameters for the Ni-based superalloy IN738 LC using Doehlert's design[J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(5): 881-892.

[7]Wang H, Zhang X, Wang G B, et al. Selective laser melting of the hard-to-weld IN738LC superalloy: Efforts to mitigate defects and the resultant microstructural and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 807: 151662.

[8]Zhou Y, Duan L C, Wu X L, et al. Effect of powder particle size on wear and corrosion resistance of S136 mould steels fabricated by selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101403.

周燕, 段隆臣, 吴雪良, 等. 粉末粒径对激光选区熔化成形 S136 模具钢的磨损与抗腐蚀性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101403.

[9]Wu W H, Yang Y Q, Wei G Q. Direct manufacturing of precision metal parts by selective laser melting[J]. China Journal of Lasers, 2007, 34: 175-179.

吴伟辉, 杨永强, 卫国强. 激光选区熔化快速成型制造精密金属零件技术[J]. 中国激光, 2007, 34: 175-179.

[10]Li K F, Mao X H, Khashayar, et al. Effects of powder size distribution on the microstructural and mechanical properties of a Co-Cr-W-Si alloy fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 825: 153973,

[11]Yang Q, Hu Y, Ding Y T, et al. Properties and formability of IN738 alloy powder for selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101402.

杨倩, 胡勇, 丁雨田, 等. 选区激光熔化所用 IN738 合金粉末的特性与成形性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 101402.

[12]Sun J F, Yang Y Q, Yang Z. Study on surface roughness of selective laser melting Ti6Al4V based on powder characteristics[J]. China Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0702004.

孙健峰, 杨永强, 杨洲. 基于粉末特性的选区激光熔化 Ti6Al4V 表面粗糙度研究[J]. 中国激光. 2016, 43(7): 0702004.

[13]Nguyen Q B, Nai M L S, Zhu Z G, et al. Characteristics of Inconel Powders for Powder-Bed

- Additive Manufacturing[J]. Engineering, 2017, 3(5): 695-700.
- [14]Wei Q S, Wang L, Zhang S, et al. Study on the effects of powder properties on the performance of stainless steel parts produced by selective laser melting[J]. Electromachining Mould, 2011(4): 52-56.
魏青松, 王黎, 张升, 等. 粉末特性对选择性激光熔化成形不锈钢零件性能的影响研[J]. 电加工与模具, 2011(4): 52-56.
- [15]Spierings A B, Herres N, Levy G. Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in additive manufactured stainless steel parts[J]. Rapid Prototyping Journal, 2011, 17(3): 195-202.
- [16]Gu H F, Gong H J, Dilip J J S, et al. Effects of powder variation on the microstructure and tensile strength of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting[C]//International Solid Freeform Fabrication Symposium. Aug. 2014, Austin, USA: FFS, 2014: 39, 470-483.
- [17]Wang L, Wei Q S, He W T, et al. Influence of powder characteristic and process parameters on SLM formability[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 40(6): 20-23.
王黎, 魏青松, 贺文婷, 等. 粉末特性与工艺参数对SLM成形的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 20-23.
- [18]Egbewande A T, Zhang H R, Sidhu R K, et al. Improvement in Laser Weldability of INCONEL 738 Superalloy through Microstructural Modification[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2009, 40(11): 2694-2704.
- [19]Campo E, Lupinc V. High temperature structural materials for gas turbines[J]. Metallurgical science & technology, 2013, 11(1): 31-45.
- [20]Balikci E, Raman A, Mirshams R A. Tensile strengthening in the nickel-base superalloy IN738LC[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(3): 324-329.
- [21]Zhong M, Sun H, Liu W, et al. Boundary liquation and interface cracking characterization in laser deposition of Inconel 738 on directionally solidified Ni-based superalloy[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(2): 159-164.
- [22]Sames W J, Unocic K A, Helmreich G W, et al. Feasibility of In Situ Controlled Heat Treatment (ISHT) of Inconel 718 During Electron Beam Melting Additive Manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2016: S221486041630241X.
- [23]Slotwinski J A, Garboczi E J. Metrology Needs for Metal Additive Manufacturing Powders[J]. Jom, 2015, 67(3): 538-543.
- [24]Rickenbacher L, Etter T, S. Hövel, et al. High temperature material properties of IN738LC processed by selective laser melting(SLM)technology[J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 19(4): 282-290.
- [25]Cloots M, Uggowitzer P J, Wegener K. Investigations on the microstructure and crack

- formation of IN738LC samples processed by selective laser melting using Gaussian and doughnut profiles[J]. *Materials&Design*, 2016, 89: 770-784.
- [26]Kunze K, Etter T, Grässlin J, et al. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting(SLM)[J]. *Materials Science&Engineering A*, 2015, 620: 213-222.
- [27]Qiu C, Chen H, Liu Q, et al. On the solidification behaviour and cracking origin of a nickel-based superalloy during selective laser melting[J]. *Materials Characterization*, 2019, 148: 330-344.
- [28]Li R D. Research on the key basic issues in selective laser melting of metallic powder[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
李瑞迪. 金属粉末选择性激光熔化成形的关键基础问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [29]Akram J, Chalavadi P, Pal D, et al. Understanding Grain Evolution in Additive Manufacturing through Modeling[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 21: 255-268.
- [30]Pan T, Li H X, Huang B Y, et al. The crystal growth, intercellular spacing and microsegregation of selective laser melted Inconel 718 superalloy[J]. *Vacuum*, 2019, 159: 382-390.
- [31]Henderson M B, Arrell D, Larsson R, et al. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications[J]. *Science&Technology of Welding&Joining*, 2004, 9(1): 13-21.
- [32]Wang N, Mokadem S, Rappaz M, et al. Solidification cracking of superalloy single-and bi-crystals[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(11): 3173-3182.

网络首发:

标题: 不同粒径粉末搭配对激光选区熔化IN738合金成形件表面粗糙度及内部缺陷的影响

作者: 胡勇, 杨小康, 康文江, 丁雨田, 许佳玉, 张会莹

收稿日期: 2020-05-09

录用日期: 2020-06-04

DOI: 10.3788/lop58.011403

引用格式:

胡勇, 杨小康, 康文江, 丁雨田, 许佳玉, 张会莹. 不同粒径粉末搭配对激光选区熔化IN738合金成形件表面粗糙度及内部缺陷的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(01):011403.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

选区激光熔化技术制备金属材料研究进展

张家莲 李发亮 张海军

武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 湖北 武汉 430081

激光与光电子学进展, 2019, 56(10):100003

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

马英怡 刘玉德 石文天 王朋 祁斌 杨锦 韩冬

北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048

激光与光电子学进展, 2019, 56(10):101403

基于选区激光熔化的316L不锈钢的裂纹形成规律及机理

潘露 张成林 王亮 刘麒慧 王刚

安徽机电职业技术学院机械工程系, 安徽 芜湖 241002

激光与光电子学进展, 2019, 56(10):101401

选区激光熔化所用IN738合金粉末的特性与成形性

杨倩 胡勇 丁雨田 许佳玉 杨小康 吴栋

兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

激光与光电子学进展, 2019, 56(10):101402

大层厚316L选区激光熔化工艺优化及性能研究

杨锦 刘玉德 石文天 张飞飞 祁斌 韩冬

北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048

激光与光电子学进展, 2019, 56(1):011401