

# 扫描间隙对激光粉床熔融 GH4169 合金 微观组织及硬度的影响

刘延星, 孙振忠, 张玉勋, 张兵, 武静

(东莞理工学院 机械工程学院, 广东 东莞 523808)

**摘要:** **目的** 研究相同激光功率、扫描速度及粉层厚度条件下, 激光粉床熔融 GH4169 合金微观组织、硬度及密度在不同扫描间隙条件下的演变规律。**方法** 采用激光粉床熔融设备制备了 GH4169 合金试样, 通过扫描电子显微镜对微观组织进行了观察, 采用硬度仪测量了试样硬度, 基于阿基米德原理测量了试样密度。**结果** 随着扫描间隙的增加, 激光粉床熔融 GH4169 合金的熔合不良缺陷增多, 密度逐渐降低。**结论** 扫描间隙对激光粉床熔融 GH4169 合金的微观组织、硬度及密度具有显著影响, 合理选取扫描间隙参数, 可有效减少熔合不良缺陷, 提高致密度和硬度。

**关键词:** 激光粉床; GH4169; 扫描间隙; 微观组织

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.01.011

**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)01-0084-04

## Influences of Hatch Distance on Microstructure and Hardness of GH4169 Fabricated by Laser Powder Bed Fusion

LIU Yan-xing, SUN Zhen-zhong, ZHANG Yu-xun, ZHANG Bing, WU Jing

(College of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the evolution of microstructure, hardness and density of GH4169 alloy fabricated by laser powder bed fusion under different hatch distances, the same laser power, scanning speed and powder thickness. GH4169 specimens were fabricated by laser powder bed fusion. Their microstructure was observed with scanning electron microscopy. Their hardness was measured with hardness tester and their density also measured based on the Archimedes principle. With the increase of hatch distance, the amount of lack-of-fusion defects increased and the density decreased. It is found that the influences of hatch distance on the microstructure, harness and density of these specimens are significant. Carefully choosing of hatch distance parameters can effectively reduce lack-of-fusion defects and improve the density and harness.

**KEY WORDS:** laser powder bed; GH4149; hatch distance; microstructure

金属材料增材制造工艺(Additive manufacturing of metallic materials, AMMM)可以直接将三维数字模型加工为实际产品,与减材制造工艺相比,AMMM工艺在近净成形方面具有天然的优势,例如可以减少产品设计和加工时间、节省原材料以及降

低能耗等<sup>[1-2]</sup>。激光粉床熔融工艺(Laser powder bed fusion, L-PBF)利用激光束斑有区域选择性地逐层熔化粉末上的粉层,成形精度较高,加工后构件相对密度可接近100%,是AMMM技术中最有应用前景的技术之一<sup>[3-5]</sup>。

收稿日期: 2020-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51905098); 广东省省级科技计划(2017B090911015); 国家重点研发计划(2017YFB1300203)

作者简介: 刘延星(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为高性能构件形性一体化控制。

GH4169 合金具有优异的综合性能,如耐高温、抗腐蚀、抗氧化等,在航空航天、核工业以及海洋工业等中的应用越来越广泛<sup>[6-8]</sup>。GH4169 合金的高硬度和低导热性导致其减材制造工艺中存在加工困难及成本高昂等问题<sup>[9]</sup>。L-PBF 技术可以制造出接近最终形状的零件,国内外众多学者针对 GH4169 合金的 L-PBF 工艺,开展了大量研究。Scime 和 Beuth<sup>[10]</sup>研究了 GH4169 合金在激光粉末熔融过程中熔池尺寸及形貌的变化。Gallmeyer 等<sup>[11]</sup>基于不同热处理工艺下激光粉末熔融 GH4169 合金微观组织与力学性能之间的关系,提出了一种新的热处理工艺。Rezaei 等<sup>[12]</sup>研究了激光粉末熔融 GH4169 合金微观组织及力学性能的各向异性。Chen 等<sup>[13]</sup>采用 L-PBF 工艺,研究了 GH4169 合金与 316 不锈钢之间的焊接过程。

L-PBF 工艺参数包括激光功率、扫描速度、扫描间隙及粉层厚度等,其中,扫描间隙为相邻激光扫描路径之间的间隙,是 L-PBF 中重要的工艺参数,因此,文中将重点研究不同扫描间隙条件下,激光粉末熔融 GH4169 合金微观组织及硬度的演变规律。

## 1 实验

材料为美国 Carpenter 公司生产的 GH4169 粉末,化学成分如下(质量分数):Ni 为 53.06%,Cr 为 19.65%,Nb 为 5.02%,Mo 为 3.07%,Ti 为 1.00%,Al 为 0.46%,C 为 0.04%,余量为 Fe。所用粉末的形貌如图 1 所示,筛分分析显示粉末粒径大部分分布在 15~45  $\mu\text{m}$ 。



图 1 GH4169 粉末的形貌  
Fig.1 Morphology of GH4169 powder

采用广东汉邦激光科技有限公司的 HB 280 型激光粉末熔融设备,制备了尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的立方块试样,制备过程中所采用的扫描路径如图 2 所示, $x$  和  $y$  方向为扫描方向, $z$  方向为沉积方向,扫描间隙为 60,80,100  $\mu\text{m}$ ,粉层厚度为 40  $\mu\text{m}$ ,扫描速度为 2000 mm/s,激光功率为 350 W。

采用 80#~2000#砂纸,对试样的  $xy$  面和  $xz$  面分别进行机械研磨,随后采用 3  $\mu\text{m}$  的金刚石悬浮液进行抛光,接着采用美国 VibroMet 2 振动抛光机进行振动

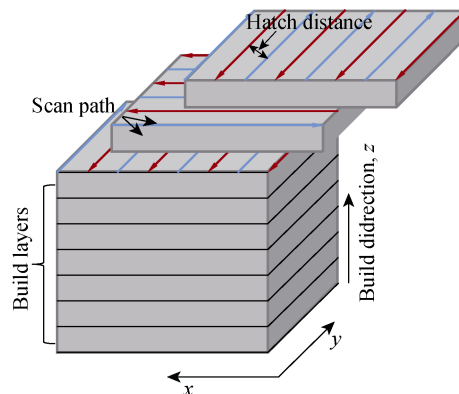


图 2 扫描路径示意图  
Fig.2 Schematic representation of scan strategy

抛光,最后采用光学显微镜(Optical microscopy, OM)和电子背散射衍射(Electron backscatter diffraction, EBSD)进行观察。对于 OM 试样,采用 100 mL HCL+100 mL  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ +5 g  $\text{CuCl}_2$  溶液进行化学腐蚀。采用 OLYMPUS-GX71 型光学显微镜和 Philips XL30FEG 型扫描电子显微镜进行微观组织观察,采用 Mitutoyo HM-102 型硬度仪进行了硬度测量,最后根据阿基米德原理,测量了试样的密度。

## 2 结果与分析

### 2.1 激光粉末熔融 GH4169 合金微观组织特征

图 3 所示为试样  $xz$  面的微观组织形貌,其中图 3a 为熔池形貌,图 3b 为晶粒形貌及取向。由图 3a—b 可知, $xz$  面晶粒形貌为沿沉积方向延伸的柱状晶,柱状晶晶内取向差异不大,并且柱状晶的生长穿过了熔池边界,跨越了多个沉积层。这是因为在粉层熔融凝固过程中,熔池的温度梯度可以高达  $10^5$  K/m,处于柱状晶生长的凝固条件内。同时,激光穿透了前一粉层熔融时所形成的熔池,前一粉层熔池和沉积层界面上未熔化的晶粒为新柱状晶的外延性生长提供了形核点<sup>[14]</sup>,因此,激光粉末熔融 GH4169 合金的晶粒组织以沿着沉积方向延伸的柱状晶为主,并且晶内的取向差异较小。此外,由图 3b 可知,晶粒形貌虽然不规则,但大部分沿着  $\langle 001 \rangle$  方向生长,这是因为 GH4169 合金的基体为面心立方结构, $\langle 001 \rangle$  方向为其晶粒长大的择优取向<sup>[15]</sup>。

图 4 所示为试样  $xy$  面的微观组织形貌,其中图 4a 所示为背散射电子图,图 4b 所示为放大后的背散射电子图。由图 4a 可知, $xy$  面上的晶粒形貌非常不规则。图 4b 显示,放大后晶粒内部具有尺寸小于 1  $\mu\text{m}$  的柱状胞晶组织,激光粉末熔融 GH4169 合金晶粒组织内部的这种柱状胞晶组织来自于凝固形态、溶质原子排斥以及热应力等因素的共同作用<sup>[11]</sup>。凝固时溶质

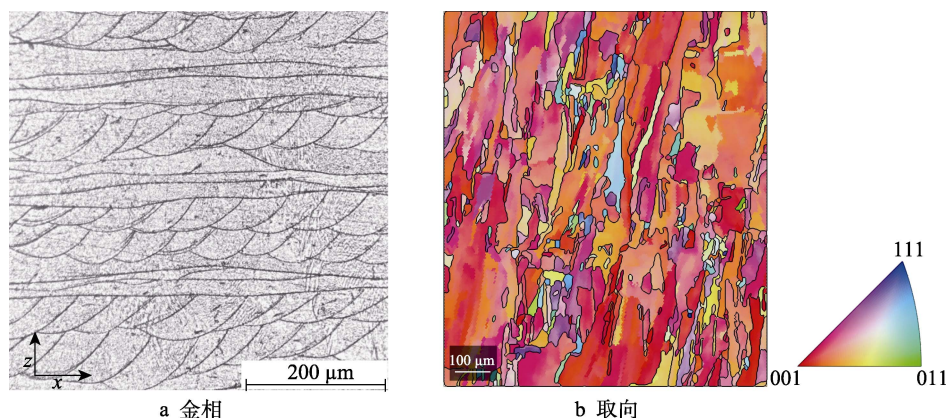


图3 扫描间隙为  $60\text{ }\mu\text{m}$  下的  $xz$  面微观组织形貌  
Fig.3 Microstructure of  $xz$  plane under hatch distance of  $60\text{ }\mu\text{m}$

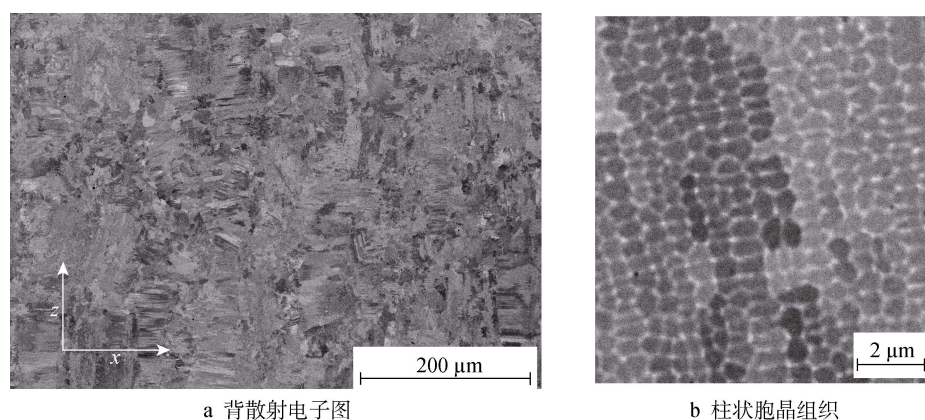


图4 扫描间隙为  $60\text{ }\mu\text{m}$  下的  $xy$  面微观组织形貌  
Fig.4 Microstructure of  $xy$  plane under hatch distance of  $60\text{ }\mu\text{m}$

原子被排斥至枝晶尖端,因此胞晶组织的尺寸取决于熔池凝固时的枝晶形状。同时,由于相邻沉积层反复熔融凝固时所产生的热应力的影响,胞晶组织的胞晶界上有位错缠结形成。

## 2.2 扫描间隙的影响

图3a及图5为不同扫描间隙下的微观组织形貌,

可知,随着扫描间隙的增加,熔合不良缺陷显著增多。这是因为激光能量密度与扫描间隙呈负相关,随着扫描间隙的增加,激光能量密度逐渐不能充分地熔化沉积层之间的粉末,导致出现搭接不良的问题。

图6为不同扫描间隙下试样的相对密度及硬度。由图6a可知,试样相对密度随着扫描间隙的减小而逐渐升高。试样相对密度随扫描间隙的演变规律与图

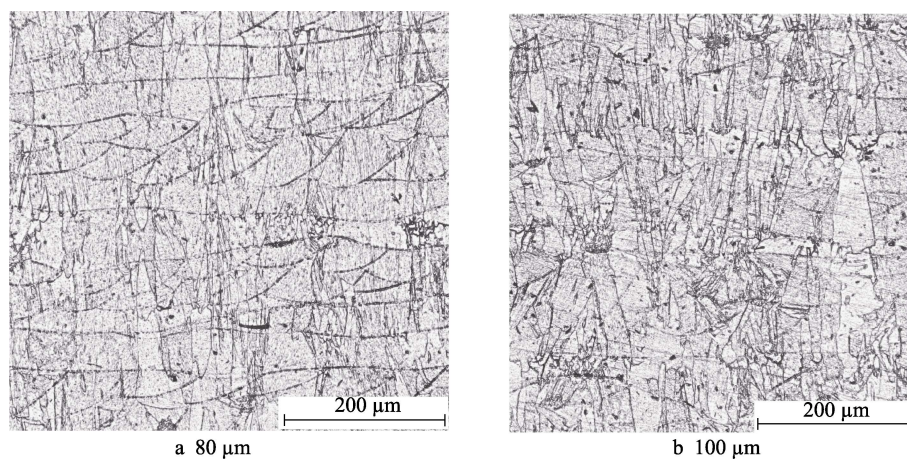


图5 不同扫描间隙下的  $xz$  面微观组织形貌  
Fig.5 Microstructure of  $xz$  plane under different hatch distances



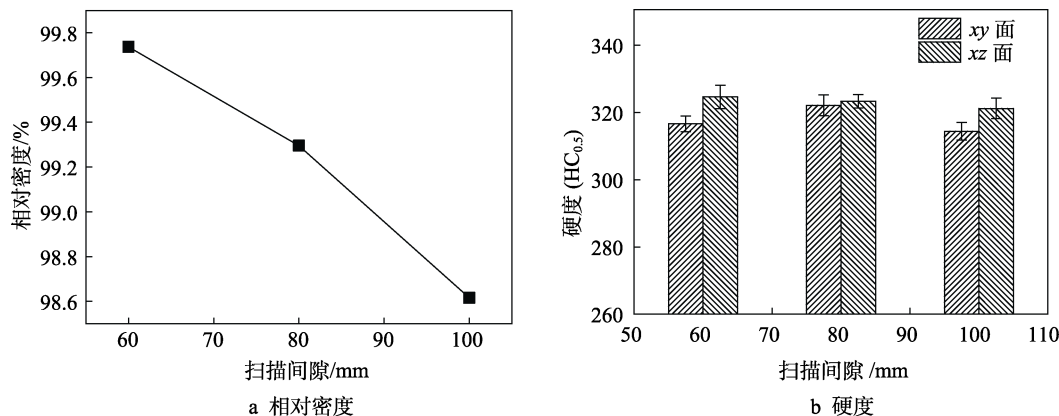


图6 扫描间隙对相对密度及硬度的影响

Fig.6 Effects of hatch distance on relative density and hardness.

3a 及图 5 的微观组织观察相吻合。随着扫描间隙的减小,激光能量密度升高,试样微观缺陷减少,相对密度随之升高。

图 6b 为试样  $xy$  面及  $xz$  面硬度随扫描间隙的演变规律,可知,不同扫描间隙下的试样硬度相差不大,而试样  $xz$  面硬度普遍高于  $xy$  面硬度,这是因为激光熔融 GH4169 合金的微观组织具有显著的各向异性。

### 3 结语

1) 激光熔融 GH4169 合金的微观组织形貌具有显著的各向异性。在平行于沉积方向上,晶粒形貌为沿沉积方向延伸的柱状晶,柱状晶晶内取向差异不大,并且柱状晶的生长穿过了熔池边界,跨越了多个沉积层;在垂直于沉积方向上,晶粒内部具有尺寸小于  $1\ \mu\text{m}$  的柱状胞晶组织。

2) 扫描间隙对激光熔融 GH4169 的微观组织及相对密度具有显著影响。随着扫描间隙的增加, GH4169 合金的微观缺陷增多,相对密度降低。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Yi, WU Lin-min, GUO Xing-ye, et al. Additive Manufacturing of Metallic Materials: a Review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(1): 1—13.
- [2] ZENOU M, GRAINGER L. Additive Manufacturing of Metallic Materials[J]. Additive Manufacturing, 2018: 53—103.
- [3] ADEGOKE O, ANDERSSON J, BRODIN H, et al. Review of Laser Powder Bed Fusion of Gamma-Prime-Strengthened Nickel-Based Superalloys[J]. Metals, 2020, 10(8): 996.
- [4] OLIVEIRA J P, LALONDE A D, MA J. Processing Parameters in Laser Powder Bed Fusion Metal Additive Manufacturing[J]. Materials and Design, 2020, 193: 108762.
- [5] MARTIN A A, CALTA N P, KHAIRALLAH S A, et al. Dynamics of Pore Formation during Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1—10.
- [6] DU Jin-hui, LYU Xu-dong, DONG Jian-xin, et al. Research Progress of Wrought Superalloys in China[J]. Acta Metall Sin, 2019, 55(9): 1115—1132.
- [7] LIN Yong-cheng, YANG hui, HE Dao-guang, et al. A Physically-Based Model Considering Dislocation-Solute Atom Dynamic Interactions for a Nickel-Based Superalloy at Intermediate Temperatures[J]. Materials and Design, 2019, 183: 108122.
- [8] WEN Dong-xu, LIN Yong-cheng, LI Xin-he, et al. Hot Deformation Characteristics and Dislocation Substructure Evolution of a Nickel-Base Alloy Considering Effects of  $\delta$  Phase[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 764: 1008—1020.
- [9] YIN Qing-an, LIU Zhan-qiang, WANG Bing, et al. Recent Progress of Machinability and Surface Integrity for Mechanical Machining Inconel 718: a Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109: 1—31.
- [10] SCIME L, BEUTH J. Melt Pool Geometry and Morphology Variability for the Inconel 718 Alloy in a Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process[J]. Additive Manufacturing, 2019, 29: 100830.
- [11] GALLMEYER T G, MOORTHY S, KAPPES B B, et al. Knowledge of Process-Structure-Property Relationships to Engineer Better Heat Treatments for Laser Powder Bed Fusion Additive Manufactured Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 101500.
- [12] REZAEI A, REZAEIAN A, KERMANPUR A, et al. Microstructural and Mechanical Anisotropy of Selective Laser Melted IN718 Superalloy at Room and High Temperatures Using Small Punch Test[J]. Materials Characterization, 2020, 162: 110200.
- [13] CHEN Wei-ying, ZHANG Xuan, LI Mei-mei, et al. Laser Powder Bed Fusion of Inconel 718 on 316 Stainless Steel[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101500.
- [14] WEI H L, KNAPP G L, MUKHERJEE T, et al. Three-Dimensional Grain Growth during Multi-Layer Printing of a Nickel-Based Alloy Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 448—459.
- [15] DENG Dun-yong, PENG Ru-lin, BRODIN H, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718 Produced by Selective Laser Melting: Sample Orientation Dependence and Effects of Post Heat Treatments[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 713: 294—306.