

# 选区激光熔化 GH4169 组织与冲击韧性分析

黄帅\*, 郭绍庆, 张国会, 周标, 闫泰起, 陈冰清, 张学军

中国航发北京航空材料研究院 3D 打印研究与工程技术中心, 北京 100095

**摘要** 采用选区激光熔化(SLM)技术制备了 GH4169 冲击韧性试样,并对其微观组织进行观察。结果表明:在优选的 SLM 工艺参数范围内,成形试样中定向凝固的细化柱状晶组织均匀排列,在功率  $P=260\text{ W}$ 、扫描速度  $v=0.9\text{ m/s}$  的条件下, GH4169 试样的室温韧性值为  $43.9\text{ J/cm}^2$ ,且随着激光功率和扫描速度的增大,冲击韧性值不断降低,冲击试样断口有明显的穿晶断裂特征。

**关键词** 激光光学; 选区激光熔化; GH4169; 组织特征; 冲击韧性

中图分类号 TG142

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.051405

## Microstructure and Impact Toughness of GH4169 Samples Fabricated by Selective Laser Melting

Huang Shuai\*, Guo Shaoqing, Zhang Guohui, Zhou Biao,  
Yan Taiqi, Chen Bingqing, Zhang Xuejun

3D Printing Research and Engineering Technology Center, Beijing Institute of Aeronautical Materials,  
Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China

**Abstract** In this study, impact toughness samples of GH4169 are prepared by selective laser melting (SLM), and the microstructures of these samples are observed. The results show that in the preferred range of the SLM process parameters, the samples form a uniform orientation of the solidified columnar grain refinement arrangement. For a power of  $P=260\text{ W}$  and scanning speed of  $v=0.9\text{ m/s}$ , the impact toughness of the GH4169 samples at room temperature is  $43.9\text{ J/cm}^2$ , and with the increase of laser power and scanning speed, the impact toughness continuously decreases, and the fracture of the impact sample has obvious transgranular characteristics.

**Key words** laser optics; selective laser melting; GH4169; microstructure characteristic; impact toughness

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390

## 1 引言

选区激光熔化(SLM)技术是 20 世纪 90 年代中期发展起来的一项激光快速成形技术,采用高能激光束选择性地照射并熔化金属粉末,可直接获得具有良好冶金结合、致密度接近 100% 的实体零件,不需要或仅需少量的后处理过程,就能实现材料的净成形或近净成形<sup>[1-2]</sup>。由于高能激光束的作用,成形时粉末材料完全熔化,所以该技术不仅能成形钛合金<sup>[3]</sup>、不锈钢<sup>[4]</sup>、铝合金<sup>[5]</sup>、高温合金<sup>[6-7]</sup>等合金材料,还能成形纯金属材料,具有广泛的成形适用

范围。

GH4169 是一种沉淀强化的镍基变形高温合金,具有良好的抗氧化性、抗疲劳性、抗蠕变性及较好的耐高温强度<sup>[8]</sup>,已广泛应用于航空航天发动机的高温部件,并成为航空航天工业中应用最广泛的高温合金<sup>[9-10]</sup>。国内外学者对选区激光熔化成形 GH4169 的研究,主要集中在不同选区激光熔化成形工艺参数对 GH4169 成形件微观组织和拉伸性能的影响<sup>[11-12]</sup>,但冲击韧性也是高温合金应用的重要性能之一<sup>[13-14]</sup>,而对选区激光熔化成形 GH4169 制件的冲击韧性研究的报道较少。本文以 GH4169 粉

收稿日期: 2019-05-29; 修回日期: 2019-07-11; 录用日期: 2019-09-10

基金项目: 北京市科技计划课题(Z181100003318001)、国家重点研发计划项目(2016YFB1100704)

\* E-mail: hshuai987@163.com

末为材料,研究了该合金的选区激光熔化成形工艺的显微组织和冲击韧性。

## 2 试样制备与试验方法

本实验采用的 GH4169 粉末化学成分如表 1 所示,形貌如图 1 所示。

在采用 400 W 单模光纤激光器作为能量源的易加三维(E-plus-3D)设备上上进行选区激光熔化成

形试验。采用不同的激光功率  $P$  (200, 230, 260, 290, 320, 350 W) 及扫描速度  $v$  (0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 进行阵列试验来成形试块,试块尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,垂直于铺粉层的方向为成形方向;依据光学显微镜下成形试块的微观组织及试块致密度测试结果,挑选出 3 个较优的工艺参数进行冲击试样的增材制造,并用扫描电子显微镜观察 3 个较优工艺参数下的微观组织。

表 1 GH4169 粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of GH4169 powder

Element	C	Cr	Ni	Co	Mo	Al	Ti	Nb	Fe
Mass fraction /%	0.043	18.70	52.76	<0.1	3.04	0.51	1.00	5.34	Bal.

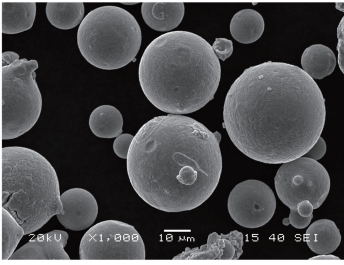


图 1 GH4169 粉末形貌

Fig. 1 Powder morphology of GH4169

采用选区激光熔化技术成形 GH4169 粉末的工艺参数如表 2 所示,所成形的冲击韧性试样尺寸为  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 57 \text{ mm}$ 。对成形后的 GH4169 进行标准热处理试验:  $980 \text{ }^\circ\text{C}$  保温 1 h,空冷至室温,再  $725 \text{ }^\circ\text{C}$  保温 8 h,然后以  $50 \text{ }^\circ\text{C/h}$  的冷却速度冷却至  $620 \text{ }^\circ\text{C}$  保温 8 h,最后空冷至室温。依据 Q/6S977—2004 中图号为 M2504-S038 (尺寸如图 2 所示,单位为 mm) 的模型,将冷却至室温的样品加工成 U 型冲击试样,如图 3 所示。

表 2 选区激光熔化试验的参数

Table 2 Parameters in the selective laser melting test

Set No.	Power /W	Scanning speed /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	260	0.9
2	290	1.2
3	350	1.5

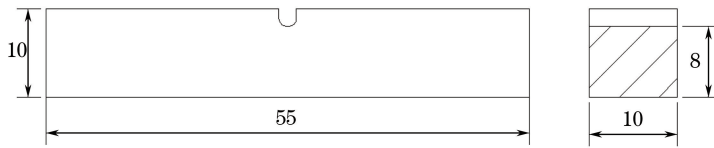


图 2 图号为 M2504-S038 的 U 型冲击试样尺寸

Fig. 2 U-shaped impact specimen size with picture number of M2504-S038

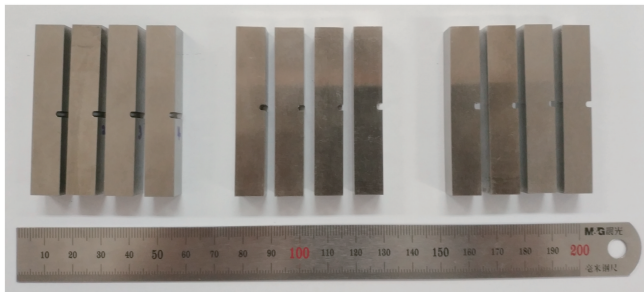


图 3 加工的试样

Fig. 3 Processed samples

### 3 试验结果与讨论

选用3组工艺参数成形的 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  GH4169 试样的微观组织如图4所示。图4(a)、(b)、(c),图4(d)、(e)、(f),图4(g)、(h)、(i)分别为第1、第2、第3组工艺参数下GH4169

成形试样 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 平面在不同放大倍率下的微观组织。由于选区激光熔化的成形方式为层层叠加,因此可以清晰地观察到层状结构的熔池形貌。3组工艺参数下成形试块的熔池形貌较为规则,均未发现沉积层之间的结构孔洞,相邻扫描轨迹的熔池截面也呈现良好的冶金结合。

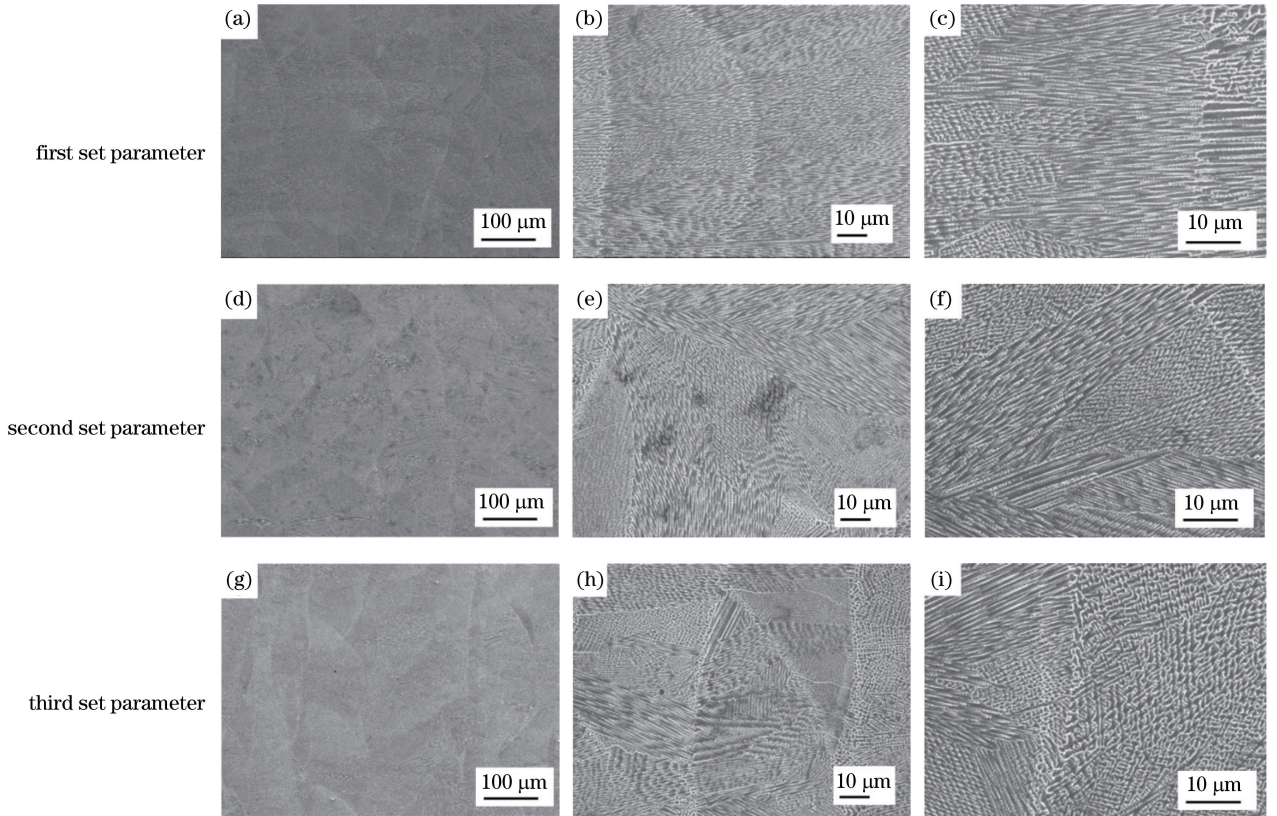


图4 不同参数下GH4169成形试样的微观组织

Fig. 4 Microstructure of GH4169 samples with different parameters

为了进一步表征试样的微观结构,在高放大倍率下观察典型位置的微观组织。在图4(c)、(f)、(i)所示的高倍放大的微观结构中观察到成形样品中定向凝固的柱状晶体结构均匀排列。

在选区激光熔化过程中,激光产生的大部分热通过先前凝固的材料或者基板散失,这为在相反的散热方向上生长柱状枝晶提供了热力学条件。由于熔池中各个位置的冷却速度在凝固过程中保持相对平衡,因此熔池中形成了大量的柱状枝晶,最终形成如图4(c)所示的柱状枝晶簇。该定向凝固的细化柱状晶组织与文献[15]中在激光能量密度为最佳值时观察到的微观组织类似。随着激光功率和扫描速度的增加,激光作用在熔池产生更多的热量,熔池中液相温度迅速上升,热量积聚带来的内能和热力学能的提升为柱状枝晶的外延生长提供了形核和生长的驱动力,使得枝晶逐步细化,形成了定向连续

生长的柱状树枝晶组织,如图4(f)、(i)所示。

从图5可以看出,第1组工艺参数下成形试样的室温韧性值最大,平均值为 $43.9\text{ J}/\text{cm}^2$ ,第2组工艺参数和第3组工艺参数下成形试样的室温韧性值

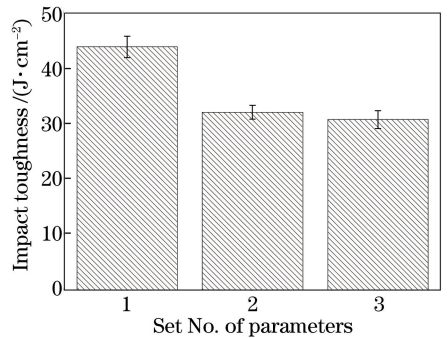


图5 不同工艺参数下试样的室温冲击韧性值

Fig. 5 Impact toughness at room temperature with different process parameters

的平均值分别为  $32.1 \text{ J/cm}^2$  和  $30.8 \text{ J/cm}^2$ 。随着激光功率和扫描速度在一定范围内增大,冲击韧性值不断降低。

3组参数下试样的断口形貌如图6所示,可以观察到试样的剪切断口平滑,断口具有明显的穿晶断裂特征。对其断口进行放大,可在其部分塑坑的底部看到一些碎裂的碳化物,但裂纹没有向周围的基体扩展,说明试样都具有良好的塑性,微

裂纹形成后其前端出现的集中应力可通过塑性变形扩散,使裂纹钝化,难以扩展。这是因为GH4169合金是典型的沉淀强化型合金,塑性变形过程中沉淀相对位错运动的阻碍作用是其强化方式。当合金中的强化相尺寸较小时,其对位错运动的阻碍作用并不大,动态载荷下变形时,多个滑移系能够同时开动,此时合金具有较强的塑性变形能力。

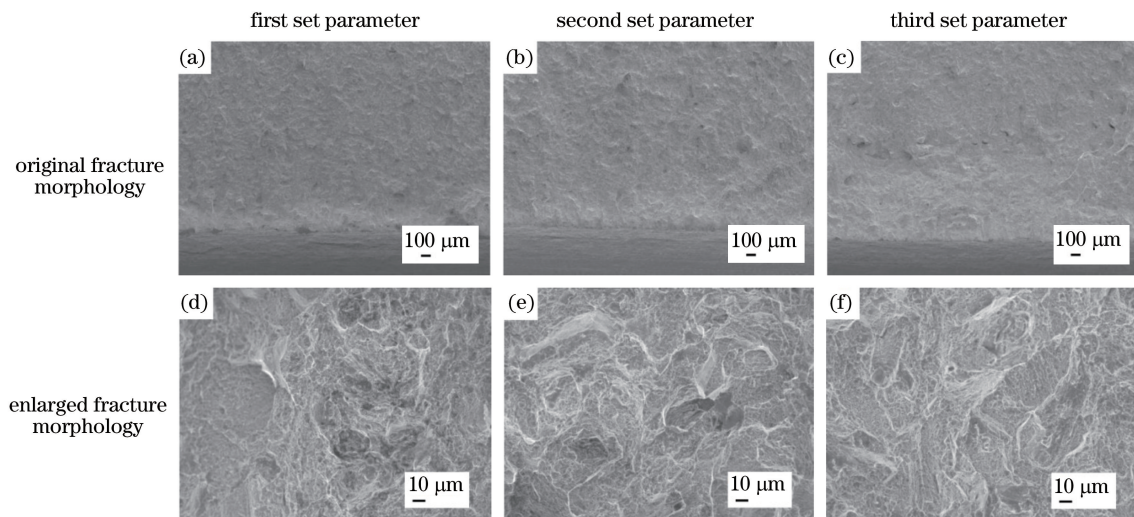


图6 不同工艺参数下GH4169冲击试样的断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology of GH4169 impact toughness samples under different process parameters

## 4 结 论

在优选的选区激光熔化工艺参数范围内,可以清晰地观察到GH4169冲击试样层状结构的熔池形貌,成形试样中定向凝固的细化柱状晶组织均匀排列。在工艺参数  $P=260 \text{ W}$ ,  $v=900 \text{ mm/s}$  的条件下,GH4169试样的室温韧性值为  $43.9 \text{ J/cm}^2$ ,且随着激光功率和扫描速度的增大,冲击韧性值不断降低,冲击试样断口有明显的穿晶断裂特征。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Y, Gu D D, Shen L D, et al. Study on selective laser melting additive manufacturing process of Inconel Ni-based superalloy [J]. *Electromachining & Mould*, 2014(4): 38-43.  
张颖, 顾冬冬, 沈理达, 等. Inconel系镍基高温合金选区激光熔化增材制造工艺研究[J]. *电加工与模具*, 2014(4): 38-43.
- [2] Gu 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.

- [3] Li J F, Wei Z Y, Lu B H. Research progress on technology of selective laser melting of titanium and titanium alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011403.  
李俊峰, 魏正英, 卢秉恒. 钛及钛合金激光选区熔化技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011403.
- [4] Xu J G, Chen Y, Chen H, et al. Influence of process parameters on forming defects of H13 steel processed by selective laser melting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 041405.  
徐锦岗, 陈勇, 陈辉, 等. 工艺参数对H13钢选区激光熔化成形缺陷的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 041405.
- [5] Zhu H H, Liao H L. Research status of selective laser melting of high strength aluminum alloy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011402.  
朱海红, 廖海龙. 高强铝合金的激光选区熔化成形研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011402.
- [6] Pan A Q, Zhang L, Wang Z M. Directional

- solidification microstructure and segregation of SRR99 superalloys by selective laser melting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 101409.
- 潘爱琼, 张莉, 王泽敏. 选区激光熔化 SRR99 高温合金的定向凝固组织及偏析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 101409.
- [7] Bean G E, Witkin D B, McLouth T D, et al. Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 207-215.
- [8] Huang Q Y, Li H K. High temperature alloy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- 黄乾尧, 李汉康. 高温合金 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [9] Luo H J, Xie J, Cheng J. Analysis and control of grain size of GH4169 alloy turbine disc forging [J]. *Heavy Casting and Forging*, 2010(6): 17-19.
- 罗恒军, 谢静, 程瑾. GH4169 合金涡轮盘锻件晶粒度分析和控制 [J]. *大型铸锻件*, 2010(6): 17-19.
- [10] Ding T S, Zhang X C, Tu S D, et al. Effect of heat treatment on microstructure and low cycle fatigue performance of GH4169 alloy at 650 °C [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2016, 37(4): 69-75.
- 丁天胜, 张显程, 涂善东, 等. 热处理对 GH4169 合金组织及 650 °C 下低周疲劳性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(4): 69-75.
- [11] Wang H L, Liu B, Liu H P, et al. Microstructure and mechanical behavior of nickel based alloy powder GH4169 fabricated by selective laser melting [J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(10): 90-92, 96.
- 王海丽, 刘斌, 刘和平, 等. 选区激光熔化镍基合金粉末 GH4169 组织与力学性能分析 [J]. *热加工工艺*, 2015, 44(10): 90-92, 96.
- [12] Wang X Q, Keya T, Chou K. Build height effect on the Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting [J]. *Procedia Manufacturing*, 2016, 5: 1006-1017.
- [13] Liu F, Sun W R, Yang S L, et al. Effect of Al on impact strength of GH4169 alloy [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2008, 22(3): 230-234.
- 刘芳, 孙文儒, 杨树林, 等. Al 对 GH4169 合金冲击性能的影响 [J]. *材料研究学报*, 2008, 22(3): 230-234.
- [14] Wang P S, Li Q M, Wei X Y, et al. Effect of solid solution on grain size and mechanical properties of GH4169 alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(4): 245-249.
- 王蓬书, 李琴敏, 韦贤毅, 等. 固溶对 GH4169 合金晶粒尺寸与力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47(4): 245-249.
- [15] Jia Q B. Selective laser melting fabrication of nickel-based superalloys and its composites: process, microstructure and property [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- 贾清波. Ni 基高温合金及其复合材料选区激光熔化成形工艺、组织及性能 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.