Material Sciences 材料科学, 2025, 15(7), 1460-1469
Published Online July 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ms
https://doi.org/10.12677/ms.2025.157155

Hans汉斯

激光粉末床熔融GH4169合金成形工艺快速优化及性能研究

陈子豪，王旭东，张小英，张大伟，李　聪，李泽东*

四川航天川南火工技术有限公司，四川 泸州

收稿日期：2025年6月3日；录用日期：2025年7月9日；发布日期：2025年7月17日

摘　要

采用正交实验 + 单因素实验、以致密度为评价指标的成形工艺快速优化方法，开展了激光粉末床熔融GH4169的成形工艺实验，使用优化后的工艺参数成形了GH4169试样，观测了GH4169的金相组织和微观组织，测试了GH4169的室温和650℃高温拉伸性能。结果表明：在一定范围内，当激光功率上升、扫描速度下降、扫描间距下降时，GH4169的致密度会呈现出先明显上升后略微下降的趋势；采用该成形工艺快速优化方法得到的工艺窗口，即激光功率305 W、扫描速度960 mm/s、单层厚度0.05 mm、扫描间距0.1 mm时，其室温和650℃高温下的力学性能均能达到国标GH4169合金的锻件要求。

关键词

增材制造，GH4169，成形工艺，快速优化，拉伸性能

Rapid Optimization of Forming Process and Performance Study for Laser Powder Bed Fusion of GH4169 Alloy

Zihao Chen, Xudong Wang, Xiaoying Zhang, Dawei Zhang, Cong Li, Zedong Li*

Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou Sichuan

Received: Jun. 3rd, 2025; accepted: Jul. 9th, 2025; published: Jul. 17th, 2025

Abstract

A rapid optimization method for forming processes was developed using orthogonal experiments

*通讯作者。

文章引用: 陈子豪, 王旭东, 张小英, 张大伟, 李聪, 李泽东. 激光粉末床熔融 GH4169 合金成形工艺快速优化及性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(7): 1460-1469. DOI: 10.12677/ms.2025.157155

combined with single-factor experiments, with density as the evaluation index, to carry out the forming process experiment of laser powder bed fusion (LPBF) of GH4169. GH4169 specimens were fabricated using optimized process parameters, followed by observations of their metallographic and microstructures, and tensile property tests at room temperatures and 650˚C. Results show that within a specific range, the density of GH4169 first significantly increases and then slightly decreases with the increase in laser powder, decrease in scanning speed, and decrease in scanning spacing. When using the process window obtained via this rapid optimization method for forming processes—laser powder of 305 W, scanning speed of 960 mm/s, single-layer thickness of 0.05 mm, and scanning spacing of 0.1 mm—the mechanical properties at both room temperature and 650˚C meet the requirements for forged parts of the national standard GH4169 alloy.

Keywords

Additive Manufacturing, GH4169, Forming Process, Rapid Optimization, Tensile Property

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

GH4169 合金是一种镍基高温合金，因其具有良好的强度、抗氧化性和耐腐蚀性，常用于热端部件的制造，广泛应用于航空航天领域[1] [2]。由于 GH4169 合金的高强度和高硬度，使其加工成复杂结构零件时存在切削变形复杂、切削温度高等问题[3] [4]，已有较多研究采用激光粉末床熔融制造技术进行制备[5] [6]。

虽然激光粉末床熔融技术为 GH4169 合金提供了新的加工方案支撑，但目前 GH4169 合金的增材制造研究整体还处于起步阶段，研究方向主要集中于通过正交试验探索工艺参数对成形质量的影响规律[7]-[9]、热处理工艺对微观组织的影响规律[10]-[12]，得到的力学性能结果仅能满足国标铸件要求[13]-[15]，而在实际生产中，工艺人员往往需要花费数周至数月的时间来优化并确定适合设备的材料成形工艺参数，且 GH4169 的性能也随之波动，干扰设计人员的材料选用及结构校核。因此，有必要为设计人员和工艺人员提供面向工程应用的工艺快速优化方法和性能数据支撑，加速其工程化应用进程。

本文针对航天航空领域对高性能复杂结构的 GH4169 合金零部件的性能需求，提出以样件制备简单和测量周期短的致密度为评价指标、以实验组数较少的正交实验确定激光能量密度区间、以实验组数较多的单因素实验确定成形工艺窗口的激光粉末床熔融增材制造成形工艺快速优化方法，设计 GH4169 合金的成形工艺实验，用得到的最优工艺窗口成形性能试样并进行各项性能测试，并与国标锻造 GH4169 棒材比较，便于在增材制造工程化应用时，实现材料的成形工艺快速优化，并提高零件性能。

2. 工艺实验

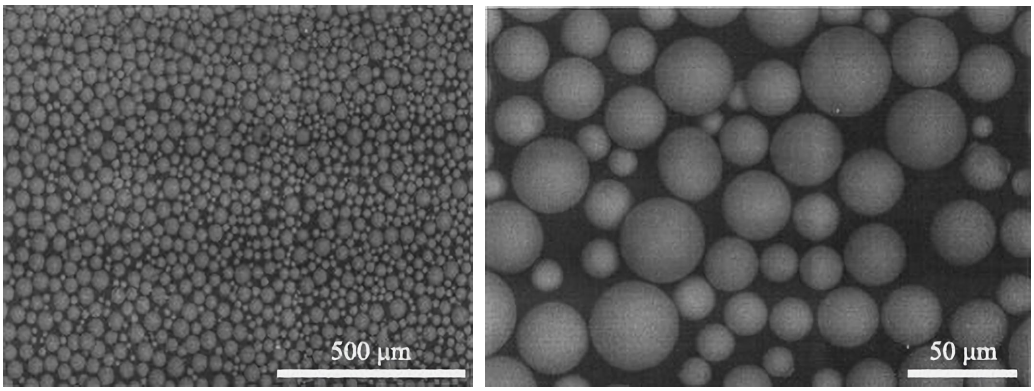
2.1. 实验设备

本文使用设备为易加三维公司的 EP-M300 型激光粉末床熔融设备，如图 1 所示，使用单路 500 W 光纤激光器，激光波长为 1064 nm，实验过程中使用 Ar 气作为保护气，控制成形仓氧含量在 100 ppm 以下。

2.2. 实验材料

本文实验材料为宁波众远新材料科技有限公司的 GH4169 粉末，粉末 D_{10} = 19.7 μm，D_{50} = 31.9 μm，D_{90} = 52.3 μm，粉末形貌如图 2 所示，球形度较好，存在极少量卫星粉。

Figure 1. EP-M300 equipment physical picture
图 1. EP-M300 设备实物图



(a) 100 倍电镜图片　　(b) 500 倍电镜图片

Figure 2. GH4169 powder morphology
图 2. GH4169 粉末形貌

实验前对粉末成分进行检测，结果如表 1 所示，符合行业标准 Q/QJA 835.1-2023《增材制造用原材料通用要求第一部分：金属粉末》要求。

Table 1. GH4169 powder ingredients test results (wt.%)
表 1. GH4169 粉末成分检测结果(wt.%)

类别	C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	Si	Fe
标准要求	≤0.08	17~21	50~55	2.8~3.3	0.2~0.8	0.65~1.15	4.75~5.5	≤0.35	余
实测值	0.032	18.7	53.93	3.12	0.47	1	5.34	0.027	余
类别	Mn	Co	Mg	B	P	S	Cu	O	N
标准要求(≤)	0.35	1	0.01	0.006	0.015	0.015	0.3	0.025	0.025
实测值	<0.01	0.065	<0.01	<0.006	<0.002	0.001	0.02	/	/

2.3. 实验设计和结果

对于激光粉末床熔融技术，工艺实验设计时的主要依据是能量密度 η，能量密度指的是单位体积上输入能量的相对大小，对于激光粉末床熔融技术而言，其受系统中激光功率、扫描速度等因素的影响，具

体为：

$$\eta = P/(h*s*v)$$

其中，P——激光功率/W，h——单层厚度/mm，s——扫描间距/mm，v——扫描速度/mm·s^{-1}。

在设计工艺实验时，先设计正交实验，对激光功率、扫描速度、扫描间距进行梯度设置，以获得大致合适的能量密度区间。设计了如表 2 所示的 3 因素 3 水平的正交实验表，其中激光功率 260~300 W，扫描速度 1100~1300 mm/s，扫描间距 0.13~0.15 mm，单层厚度固定不变为 0.05 mm，成形 10 mm × 10 mm × 10 mm 试样块。

Table 2. Table of orthogonal experiment of GH4169
表 2. GH4169 正交实验表

	激光功率/W	扫描速度/mm·s^{-1}	扫描间距/mm
水平 1	260	1100	0.13
水平 2	280	1200	0.14
水平 3	300	1300	0.15

成形后，以试样块的密度和致密度作为评价指标，密度越接近材料的理论密度、致密度越接近 100%，代表着粉末熔融效果越好，工艺参数越合适。使用排水法测量各试样块的密度和致密度，得到的结果如表 3 所示。

Table 3. Orthogonal experiment results of GH4169
表 3. GH4169 正交实验结果

序号	激光功率/W	扫描速度/mm·s^{-1}	扫描宽度/mm	单层厚度/mm	密度/g·cm^3	致密度/%
1	260	1100	0.13		7.892	95.78
2	280	1200	0.13		7.913	96.03
3	300	1300	0.13		8.005	97.15
4	280	1100	0.14		8.152	98.93
5	300	1200	0.14	0.05	8.177	99.24
6	260	1300	0.14		7.802	94.68
7	300	1100	0.15		8.206	99.59
8	260	1200	0.15		7.943	96.40
9	280	1300	0.15		7.995	97.03

计算各组实验参数对应的能量密度，得到能量密度与致密度的影响规律如图 3 所示。可以看出，随着能量密度的增大，所得试样的致密度也随之升高；当致密度大于 35.7 J/mm^3 时，试样的致密度才能达到 98%以上。

在正交实验中发现，随着激光的快速移动，存在熔池内的金属会向外溅射的现象。通过查阅文献发现，当扫描速度过低时，单位体积内的粉末吸收的能量较多，形成的液相体积较大，一方面熔池容易向已成形层汇聚，出现断续的液柱、表面高度差较大等现象，进而导致下一层的铺粉厚度不均匀，另一方面还会吸入附近未熔化的粉末颗粒，半熔融状态的颗粒会导致孔洞的出现，二者共同作用导致致密度下降；当扫描速度过快时，一方面单位体积内粉末吸收的能量更少，导致熔池较小，另一方面粉末会受到

较大的能量冲击而出现飞溅的现象，导致熔池内部出现孔洞，导致致密度下降。因此，判断金属飞溅的现象主要是因为扫描速度过快而导致的。

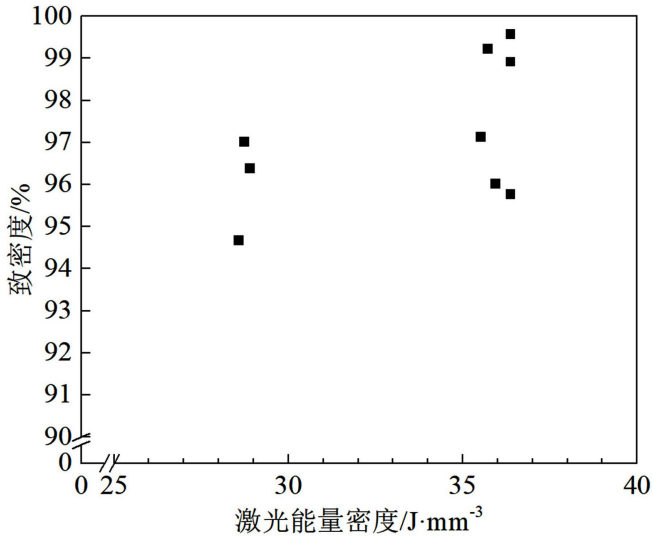


Figure 3. Relationship between orthogonal experiment energy density and density of GH4169
图 3. GH4169 正交实验能量密度与致密度关系

同时，正交实验结果仅体现了能量密度和致密度的正相关关系，未得到符合工业应用需求的最优工艺，因此在此基础上进一步设计了能量密度更高的激光功率和扫描间距的单因素实验，实验参数和结果如表 4 所示。

Table 4. Single-factor experiment design and results of GH4169
表 4. GH4169 单因素实验设计及结果

序号	激光功率/W	扫描速度/mm·s^{-1}	扫描宽度/mm	单层厚度/mm	密度/g·cm^3	致密度/%
1	285		0.09		8.148	98.88
2	295		0.09		8.222	99.78
3	305		0.09		8.23	99.88
4	315		0.09		8.21	99.64
5	285		0.1		8.202	99.54
6	295		0.1		8.23	99.88
7	305		0.1		8.238	99.98
8	315	960	0.1	0.05	8.232	99.90
9	285		0.11		8.17	99. 15
10	295		0.11		8.207	99.90
11	305		0.11		8.219	99.75
12	315		0.11		8.235	99.94
13	285		0.12		8.165	99.09
14	295		0.12		8.22	99.76
15	305		0.12		8.206	99.59

综合两组实验数据，得到能量密度与致密度在更大范围内的关系，结果如图 4 所示。可以看出，随着能量密度的增大，致密度先快速增大，然后增大速率变缓，最后开始逐渐下降。

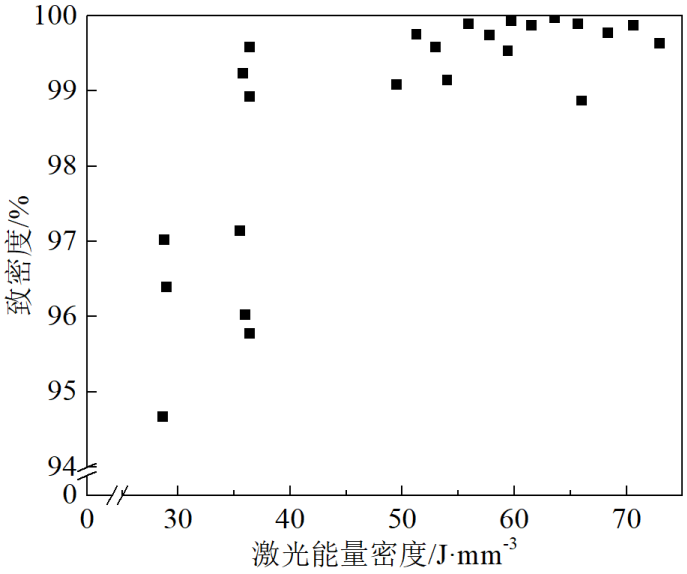


Figure 4. Relationship between forming energy density and density of GH4169
图 4. GH4169 成形能量密度与致密度关系

结合能量密度计算公式，在一定范围内，当激光功率上升、扫描速度下降、扫描间距下降时，会导致能量密度上升，进而导致 GH4169 的致密度会呈现出先明显上升后略微下降的现象。

对两组实验结果进行分析，当激光功率过低时，形成的熔池较小且温度较低，一方面熔化的粉末数量较少，另一方面熔池凝固会过快，造成熔池内部因激光冲击带入的气体和空心粉末中的气体来不及上浮溢出，形成气孔，导致致密度较低；当激光功率过高时，熔池内部在马兰戈尼对流的作用下，熔池内部从底部的高温区向侧壁的低温区流动，在反冲击力的作用下熔池金属溅射出金属射流，在表面张力的作用下形成熔池飞溅，飞溅的金属液滴落在金属表面，影响下层铺粉，导致试样致密度降低。

当扫描速度过低时，形成的液相体积较大，由于断续液柱、表面高度差较大等现象，导致下一层铺粉厚度不均匀，由于吸入熔池附近未熔化的粉末颗粒而出现的半熔融粉末，导致出现孔洞，对致密度产生负面影响；当扫描速度过快时，在较小的熔池和因能量冲击而产生飞溅的综合影响下，熔池内部的粉末熔化量少，内部容易出现孔洞，导致致密度下降。

当扫描间距过低时，同一区域会得到多次能量输出，粉末和已成型的试块会反复重熔，晶粒不断长大，熔点较低的元素挥发，导致致密度和力学性能的同步降低；当扫描间距过大时，两道扫描间的粉末得不到足够的能量输入，无法充分熔化，导致内部因存在松散粉末或未完全熔融粉末堆积而出现孔洞，致密度下降。

GH4169 的理论密度为 8.24 g/cm^3，根据试验结果发现单因素实验 7#的密度最为接近，致密度也最高，为 99.98%，根据能量密度计算公式得其能量密度为 63.54 J/mm^2。

经正交试验和单因素试验优化工艺后，使用如表 5 所示的工艺参数成形测试试样。

成形后对测试试样进行固溶双时效热处理，先在真空环境下，升温到 980℃，氩气冷却至室温；然后在炉温 ≤200℃条件下，升温到 720℃，保温 8 h，以 50℃/h 降温速率，冷却到 620℃，保温 8 h，氩气冷却到室温。

Table 5. Forming process parameters of GH4169
表 5. GH4169 成形工艺参数

激光功率/W	扫描速度/mm·s^{-1}	单层层厚/mm	扫描间距/mm	每层扫描方向增量角度/°
305	960	0.05	0.1	67

3. 性能测试结果与讨论

3.1. 表面粗糙度

实验完成后，使用线切割将试样从基板上切下，目视观测试样表面较为粗糙，使用粗糙度仪检测试样表面粗糙度，结果如图 5 所示。由于激光光斑直径为 0.1 mm，选用粉末的最大直径超过 55 μm，所以在增材制造的过程中，成形外轮廓时必然存在部分粉末因不完全在成形区域内而出现只能部分熔融的现象，在成形结束后，这种现象就会导致零件外表面存在一层未完全熔融的粉末颗粒，表面较为粗糙。

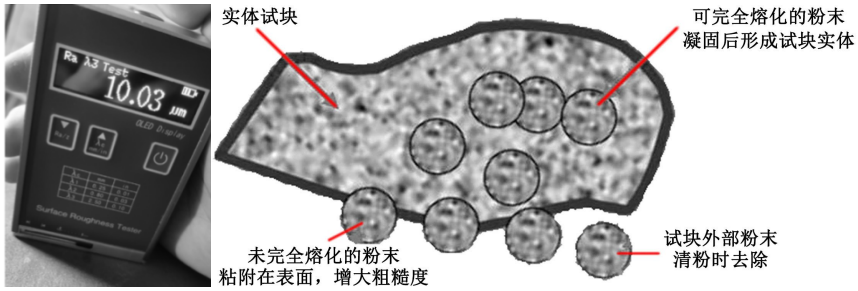


Figure 5. Measured surface roughness values and schematic diagram
图 5. 表面粗糙度实测值和示意图

因此，在设计零件时，应在零件三维模型的外表面增加一定量的打磨余量，以通过钳工打磨或磨粒流等手段保障表面粗糙度达到设计要求。

3.2. 微观组织

在试样经过固溶双时效热处理后，使用试样制备金相试样，经打磨、抛光后使用光镜和电镜进行金相组织和微观组织观测，结果分别如图 6 和图 7 所示。

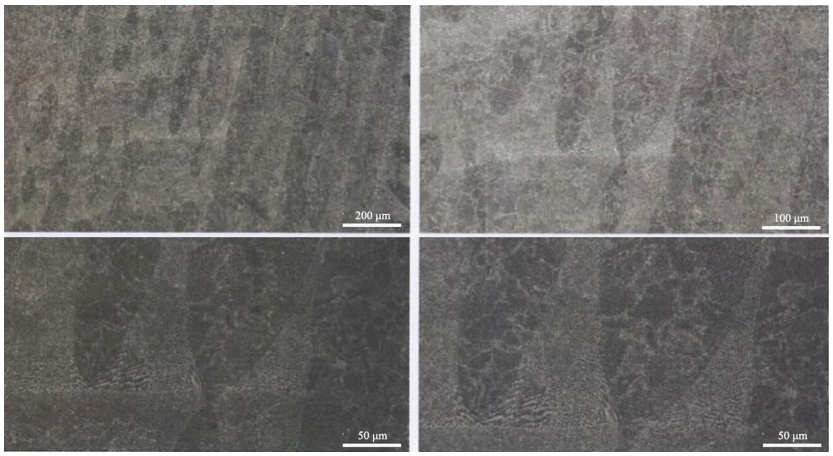


Figure 6. Metallographic structure of the GH4169 sample
图 6. GH4169 试块金相组织

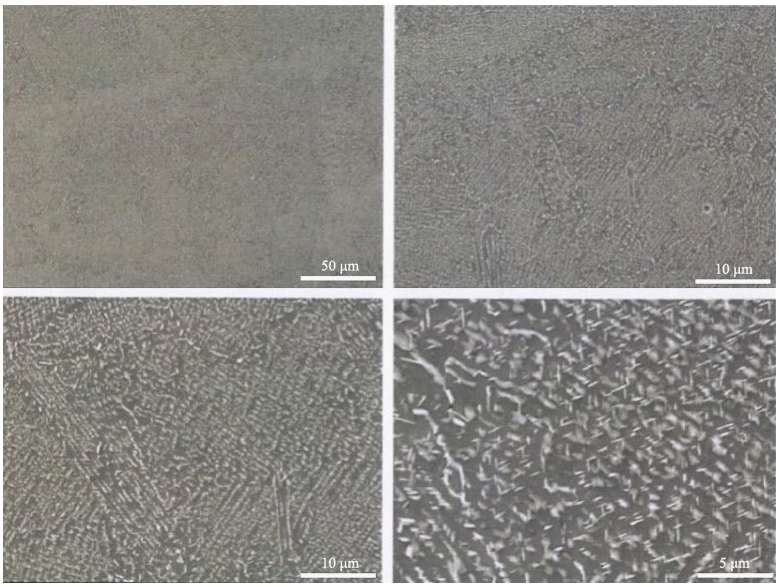
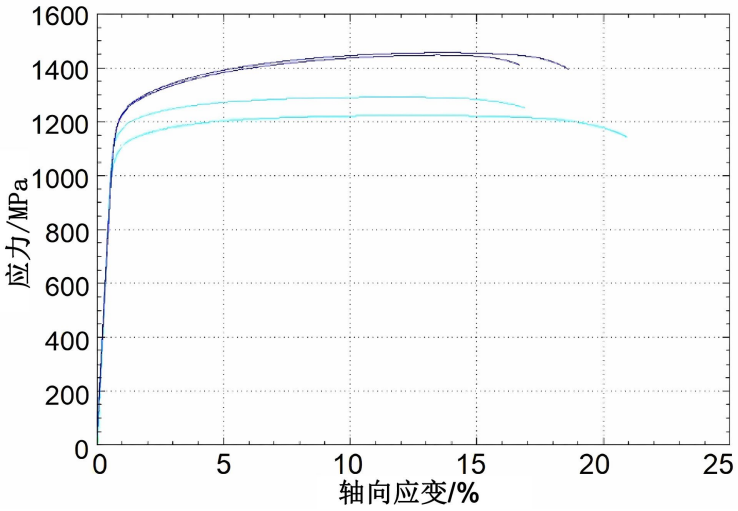


Figure 7. Microstructure of the GH4169 sample
图 7. GH4169 试块微观组织

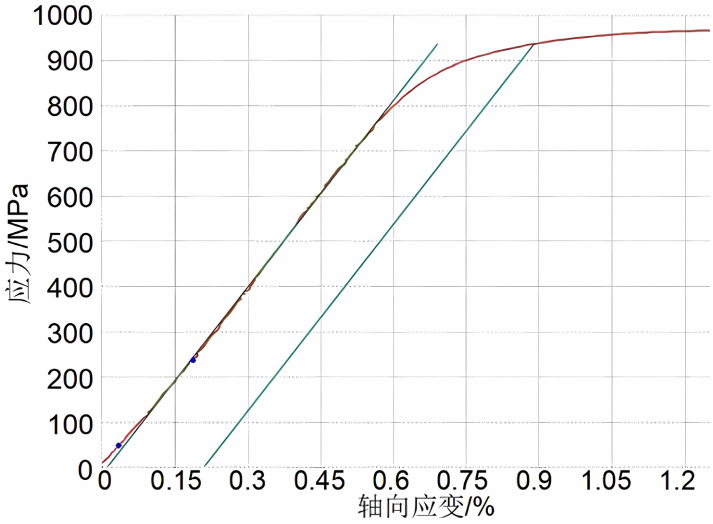
图 6 可以清晰地看见宽度约 100 μm 长条状的熔道，熔道边界与相邻熔道搭接重熔区域发白，说明存在成分偏析。

由于激光粉末床熔融增材制造过程中的高能量密度和扫描速度会产生快热快冷现象，GH4169 粉末会先快速熔化、再快速从熔池中凝固，形成细小晶粒组织，因此在图 7 中整体为胞状组织，平均尺寸约为 0.7 μm。而由于搭接策略的存在，单道熔池边缘的热影响区会由于反复重熔过程存在热积累，晶粒逐渐生长得更加粗大和杂乱。在高倍率微观组织观测图像中，可以看到晶间存在微观偏析，为白色连续的 Laves 晶间析出相和白色针状的 δ 相。Laves 相可以提高 GH4169 的抗氧化性、热疲劳性和蠕变性，但会导致材料抗拉强度和塑性下降；δ 相能够控制晶界迁移，起到阻碍晶粒长大的钉扎作用，有助于细化晶粒、提高材料拉伸强度。

3.3. 拉伸强度



(a) 室温拉伸曲线



(b) 650℃拉伸曲线

Figure 8. Tensile property curve of the GH4169 sample
图 8. GH4169 试样的拉伸性能曲线

分别按 GB/T 228.1-2021《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》和 GB/T 228.1-2015《金属材料拉伸试验第 2 部分：高温试验方法》标准分别进行 4 组室温和 4 组 650℃高温拉伸性能试验，拉伸曲线如图 8 所示，统计试验结果如表 6 所示，其中国标行数据为 GB/T 40303-2021《GH4169 合金棒材通用技术条件》中对于固溶 + 时效处理后的 GH4169 锻制棒材力学性能要求。

Table 6. Results of the tensile property test
表 6. 拉伸性能试验结果

序号	温度/℃	方向	拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	断面收缩率/%	断后伸长率/%
国标	25	/	≥1240	≥1030	≥8	≥6
1	25	X-Y	1451	1207	32	18
2			1455	1204	28	19
3		Z	1313	1167	37	23.5
4			1295	1148	33	18.5
国标	650	/	≥965	≥860	≥8	≥6
5	650	X-Y	1158	971	13	12.5
6			1202	1034	17	9.5
7		Z	1078	959	36	18
8			1095	968	32	14

可以看出，激光粉末床熔融制备的 GH4169 高温合金在室温和 650℃时的拉伸性能均符合国标要求，分析原因有两点：一是由于激光粉末床熔融成形过程中的快冷快热作用，晶粒尺寸比锻件晶粒(6 级或更细，即<125 μm)更小，根据 Hall-Patch 效应，随着晶粒尺寸的减小，材料的强度会由于晶间强化作用而提高；二是成形工艺合适，致密度高，Laves 相较少，对材料性能的负面影响较小。

同时可以看出在相同测试温度下拉伸性能存在方向差异性：X-Y 方向试样的强度更高、塑性更低；

Z 方向试样的强度更低、塑性更高。分析是因为 Z 向为材料累加成形的方向，层与层之间的连接力不如单层内材料的连接力大，所以强度更低而塑性更好。

4. 结论

本文优化了激光粉末床熔融 GH4169 合金成形工艺，使用优化后的工艺参数制备了 GH4169 高温合金试样，使用试样进行了各项测试，得到以下结论：

1) 以致密度为评价指标、以正交实验确定激光能量密度区间、以单因素实验确定成形工艺窗口的激光粉末床熔融成形工艺快速优化方法切实有效，能够仅通过两组工艺实验快速得到 GH4169 材料的最优工艺窗口，样件致密度达 99.98%。

2) 能量密度与激光功率呈正相关关系，与扫描速度、扫描间距呈负相关关系。在一定范围内，当激光功率上升、扫描速度下降、扫描间距下降时，会导致能量密度上升，进而导致 GH4169 的致密度会呈现出先明显上升后略微下降的趋势。

3) 在激光功率 305 W、扫描速度 960 mm/s、单层厚度 0.05 mm、光斑直径 70 μm、扫描间距 0.1 mm 的成形工艺参数时，激光粉末床熔融增材制造的 GH4169 材料的室温和 650℃高温力学性能均达到国标 GH4169 锻件水平，Z 向比 X-Y 向的强度略低、塑性更高。

参考文献

[1] 唐中杰, 郭铁明, 付迎, 等. 镍基高温合金的研究现状与发展前景[J]. 金属世界, 2014(1): 36-40.

[2] 杜金辉, 吕旭东, 邓群, 等. GH4169 合金研制进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(12): 12-21.

[3] 郝兆朋. 切削 GH4169 的相关机理及高效切削技术的基础研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[4] 周俊. 镍基高温合金 GH4169 高速切削相关技术与机理的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[5] Frazier, W.E. (2014) Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **23**, 1917-1928. https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z

[6] 张小伟，金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 10-16.

[7] 杜胶义, 刘斌, 刘和平. 选区激光熔化工艺参数对 GH4169 成型件致密度的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 28-34.

[8] 魏建锋, 武美萍, 韩基泰. 扫描策略对 SLM 成形 Inconel 718 表面质量的影响机制[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 621-625.

[9] 刘璐, 欧阳佩旋, 黄瑾, 等. 工艺参数对 SLM 成型 GH4169 合金微观组织和残余应力的影响[J]. 热喷涂技术, 2024, 16(2): 36-45.

[10] 孙兵兵, 姜涛, 雷杨, 等. 热处理对 3D 打印制备 GH4169 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(10): 10-14.

[11] 倪磊, 刘建华, 王安东, 等. 双时效对 SLM 成形 GH4169 合金组织与拉伸性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(10): 60-69.

[12] 耿硕, 张冬云, 李健民, 等. 均质化处理对激光选区熔化 GH3536 和 GH4169 合金组织和显微硬度的影响[J]. 航空材料学报, 2024, 44(1): 72-83.

[13] 王会杰, 崔照雯, 孙峰, 等. 激光选区熔化成形技术制备高温合金 GH4169 复杂构件[J]. 粉末冶金技术, 2016, 34(5): 368-372.

[14] 栗子林, 路超, 程格, 等. 选区激光熔化 GH4169 成型件微观组织及力学性能研究[J]. 应用激光, 2019, 39(1): 48-53.

[15] 胡娟, 高银涛, 吕新峰, 等. 激光粉末床熔融 GH4169 合金成形工艺及性能研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(24): 141-145.