

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5034

激光选区熔化制备 GH4099 合金力学性能的各向异性

陈子昂¹, 李琪馨², 焦世坤¹, 钱远宏¹, 宋超群¹, 韩冬雪¹, 赵春志², 王亮²

(1. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100071; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 基于近年来对镍基高温合金部件性能可靠性需求的提升, 以激光选区熔化成形制备 GH4099 高温合金为研究对象, 探究其微观组织和力学性能的各向异性。利用 OM、SEM、EBSD 等分析测试方法对沉积态 GH4099 合金微观组织进行表征, 并在室温下沿水平和沉积方向进行拉伸试验, 探究微观组织与力学性能之间的关系。实验结果表明, 沉积态样品由沿沉积方向外延生长的柱状晶构成, 有少量小尺寸碳化物存在, 但无第二相析出。水平方向的屈服强度和断裂强度均大于沉积方向, 但伸长率较小, 两个方向的断口都表现出典型的穿晶断裂形貌。

关键词: 激光选区熔化; GH4099 高温合金; 微观组织; 力学性能; 各向异性

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)06-0564-07

Anisotropy of the Mechanical Properties of GH4099 Alloy Fabricated via Selective Laser Melting

CHEN Ziang¹, LI Qixin², JIAO Shikun¹, QIAN Yuanhong¹, SONG Chaoqun¹, HAN Dongxue¹,
ZHAO Chunzhi², WANG Liang²

(1. Beijing Xinghang Electro-mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100071, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: In response to the increasing demand for reliable performance of nickel-based superalloy components in recent years, this study focused on a GH4099 superalloy fabricated via selective laser melting to investigate the anisotropy in its microstructure and mechanical properties. The microstructure of the as-deposited GH4099 alloy was characterized via OM, SEM and EBSD, and tensile tests were conducted at room temperature in both the horizontal and deposition directions to investigate the relationships between the microstructure and mechanical properties. The experiment reveals that the as-deposited sample consists of columnar crystals that epitaxially grow along the deposition direction, with a small amount of small carbides present but no second phase precipitation. The yield strength and fracture strength in the horizontal direction are both greater than those in the deposition direction, but the elongation is lower. The fracture surfaces in both directions exhibit typical transgranular fracture morphologies.

Key words: selective laser melting; GH4099 superalloy; microstructure; mechanical properties; anisotropy

GH4099 镍基高温合金是一种典型的沉淀强化合金, 其中 γ' 相, 即 $\gamma'-\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, 为主要析出相, 起强化作用。合金中含有 19%(质量分数)的 Cr 元素使得其具有很好的耐腐蚀性能^[1], 同时由于 Co、Mo、W 元素固溶强化作用, GH4099 合金具有优异的热稳定性, 不仅能够 在 800~900 °C 下稳定使用, 在 1 000 °C

下也能短暂使用, 在航空航天和核工程等领域得到广泛应用^[2-5]。近年来随镍基高温合金部件轻量化、高可靠性、构件成形一体化等方面需求的日益增加, 传统成形工艺已经无法适应实际生产^[6], 激光选区熔化(selective laser melting, SLM)技术为 GH4099 合金零件生产难题提供了解决方案。

收稿日期: 2025-03-05

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF1400302)

作者简介: 陈子昂, 1988 年生, 硕士, 高级工程师。主要从事金属轻量化结构增材制造技术研究方面的工作。

Email: chenziang_2518@163.com

通信作者: 王亮, 1981 年生, 博士, 教授。研究方向为先进金属材料熔炼凝固及增材制造技术。Email: wliang1227@hit.edu.cn

引用格式: 陈子昂, 李琪馨, 焦世坤, 钱远宏, 宋超群, 韩冬雪, 赵春志, 王亮. 激光选区熔化制备 GH4099 合金力学性能的各向异性[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 564-570.

CHEN Z A, LI Q X, JIAO S K, QIAN Y H, SONG C Q, HAN D X, ZHAO C Z, WANG L. Anisotropy of the mechanical properties of GH4099 alloy fabricated via selective laser melting[J]. Foundry Technology, 2025, 46(6): 564-570.

激光选区熔化是常见的增材制造技术之一,适用于复杂结构零件一体化成形,材料利用率高、尺寸精度高、加工余量小,同时由于其独特的循环加热、快速冷却等特点,成形工件能够获得独特的微观组织和力学性能,具有良好的发展前景^[7-8]。研究人员针对 SLM 成形 GH4099 合金进行了很多研究。潘维等^[9]发现 SLM 成形 GH4099 合金中存在大量位错亚结构及亚结构界面处的细小碳化物,这些非平衡态组织对合金起强化作用,使其硬度可保持在 300 HV。Zhang 等^[10]发现提高激光扫描速度使熔池中柱状晶向等轴晶转变,相应织构强度降低,同时在高扫描速度下,凝固速率的增加会导致晶粒细化。

目前激光选区熔化技术是常见的 GH4099 镍基高温合金成形方式,但依旧有一些局限性亟待解决^[11]。根据之前的研究,SLM 成形合金微观组织由沿沉积方向外延生长的柱状晶构成,强织构的存在导致严重的各向异性,进而导致力学性能的各向异性^[1,12-14]。Liu 等^[15]对 SLM 成形 GH4099 合金沿水平和沉积方向进行室温拉伸,发现沉积方向的屈服强度和断裂强度都低于水平方向,性能存在明显各向异性。Zhang 等^[12]发现 SLM 成形 GH4099 合金室温拉伸水平方向断裂强度和屈服强度分别比沉积方向大 116 和 101 MPa,而伸长率则比沉积方向低 9.2%。李范等^[9]经实验发现 SLM 成形 GH4099 合金强度水平方向整体优于沉积方向,断裂强度和屈服强度分别相差 144 和 37 MPa,而水平方向和沉积方向伸长率分别为 29%和 34%,沉积方向表现出更优的断后伸长率。综上所述,SLM 成形 GH4099 合金的力学性能方向性差异通常表现为水平方向的强度高于沉积方向,而沉积方向拥有更高的断后伸长率。

对于常应用于航空航天和发动机部件的镍基高温合金,力学性能是评估其工作能力的重要指标。近年来国内对于激光选区熔化成形 GH4099 合金主要集中在工艺参数优化和后续热处理等方面,对于沉积态试样微观组织和力学性能的研究较少。

本文以沉积态 SLM 成形 GH4099 合金为研究对象,对其不同方向的微观结构和力学性能进行表征与检测,分析其形成原因和变形机制相关性,建立组织-性能之间的理论联系,所获得的结果有助于更深入地了解微观结构和力学性能,为后续相关研究及应用提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用原料为 GH4099 合金粉末,其成分见表 1。粉末形貌如图 1 所示,粉末整体呈球形,表面光滑,球形度高,含有少量卫星颗粒,经统计所得粒径集中在 25~45 μm 。激光功率 300 W,扫描速率 1 200 mm/s,扫描间距 0.075 mm,铺粉厚度 0.04 mm。

表 1 GH4099合金粉末化学成分
Tab.1 Composition of the GH4099 alloy powder
(mass fraction/%)

Element	Al	Co	Cr	Mo	Ti	W	Ni
Content	1.97	5.96	16.65	4.03	1.21	6.42	Bal.

1.2 组织表征及性能分析

使用电火花线切割制取样品,在试样水平方向和竖直方向(沉积方向)分别取样,选择待观察面用砂纸(240、400、600、800、1 000、1 200、1 500、2 000 目)进行机械打磨,随后使用二氧化硅金相抛光液(1.0、0.5 μm)在抛光机上进行机械抛光。将抛光后的样品进行腐蚀,腐蚀液成分为 2 mL HF+20 mL HNO₃+76 mL H₂O+100 mL HCl,借助光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)观察试样内部显微组织,扫描电镜型号为 Merlin Compact 型蔡司场发射扫描电镜和日立 SU5000 扫描电镜,并利用能谱仪(EDAX)进行波普分析。EBSD 样品需用 70% H₃PO₄+30% H₂O(体积分数)电解抛光液在 5 $^{\circ}\text{C}$ 下进行电解抛光,借助 SUPRA55 ZEISS 型扫描电镜对沉积试样进行 EBSD 晶体取向分析,利用 AztecCrystal 后处理软件提取晶体学信息。在室温环境下对样品进行拉伸性能测试,拉伸试样规格

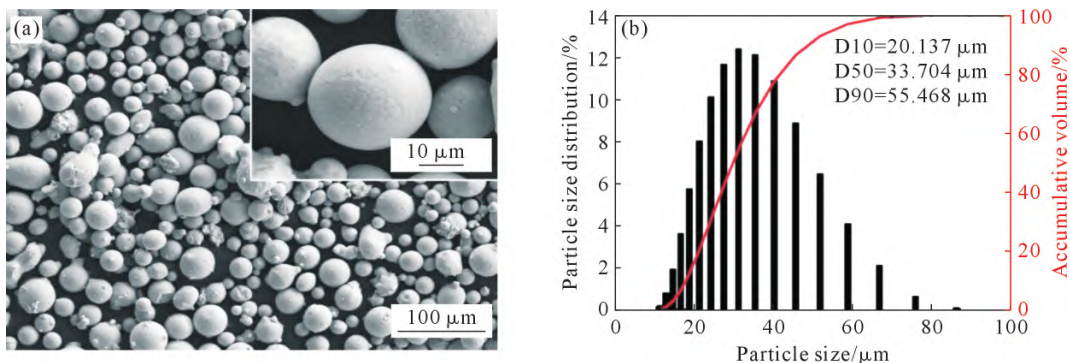


图 1 SLM 成形粉 GH4099 合金粉末原料:(a) SEM 谱;(b) 粉末粒径范围

Fig.1 Morphology of the GH4099 alloy powder: (a) SEM micrograph; (b) distribution of powder sizes

和取样位置如图 2 所示, 所用设备为 Instron 5569 型电子万能试验机, 拉伸速率 1 mm/min。之后通过扫描电镜对断口进行表征。

2 实验结果及讨论

2.1 显微组织

使用 OM 和 SEM 对沉积态试样沉积方向水平方向进行观察, 如图 3 所示, 试样沉积方向看到明显的熔池结构, 晶粒沿沉积(XOZ)方向穿层生长, 不同层间晶粒取向发生较大变化。这种独特特征是由 SLM 激光逐层扫描、粉末逐层进行堆积的制造方式产生的。在水平(XOY)方向上可以看到同一沉积层内的熔池结构相互平行, 结构与激光扫描轨迹相对应, 层与层之间冶金结合能力较好, 熔道之间彼此

搭接相连, 形成致密组织。此外, 在 SEM 图像中观察到晶粒内部存在尺寸较小的亚结构, 这与 SLM 过程中拥有的极快的冷却速率($10^6 \sim 10^8$ K/s)和凝固速率有关^[16]。晶粒亚结构存在两种形态, 即胞状枝晶和树枝晶, 对于成型样品的不同方向, 两种枝晶结构含量存在差别, 水平方向主要为胞状枝晶, 而沉积方向则存在更多树枝晶。图 4 为沉积态试样 XOZ 方向的高倍 SEM 像, 通过此图像能够清晰观察到胞状枝晶和树枝晶亚结构形貌。

为进一步探究 SLM 成形的元素偏析情况, 从样品 XOY 方向取样进行分析, 所得 SEM-EDS 图谱如图 5 所示。从图中可以看出, C 元素在枝晶间大量富集, Al 元素枝晶间含量略高于枝晶内, 但含量分布相对均匀, 而 Cr 元素在枝晶间的含量低于枝晶内, 根据

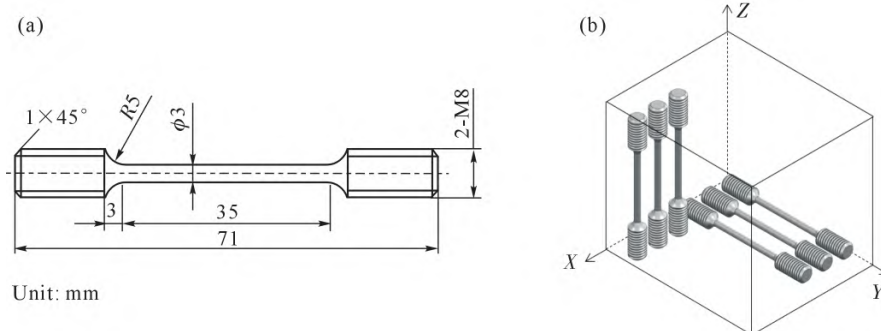


图 2 GH4099 拉伸试样: (a) 拉伸试样示意图; (b) 拉伸试样截取示意图

Fig.2 GH4099 tensile test samples: (a) schematic diagram of the tensile test samples; (b) schematic diagram of the tensile test samples

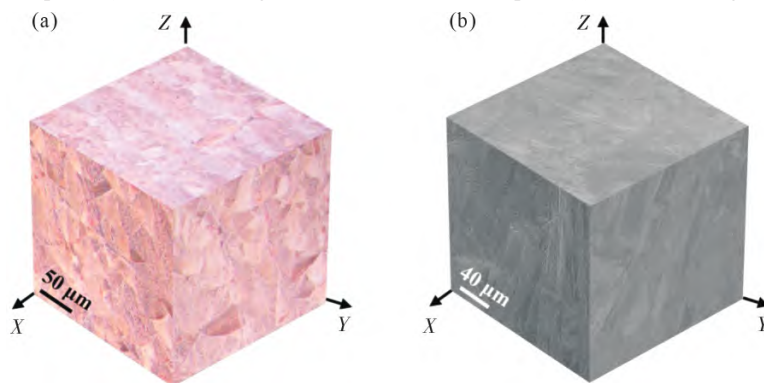


图 3 沉积态 SLM GH4099 合金形貌: (a) OM 图; (b) SEM 图

Fig.3 Metallographic morphology of the as-deposited SLMed GH4099 alloy: (a) OM micrograph; (b) SEM micrograph

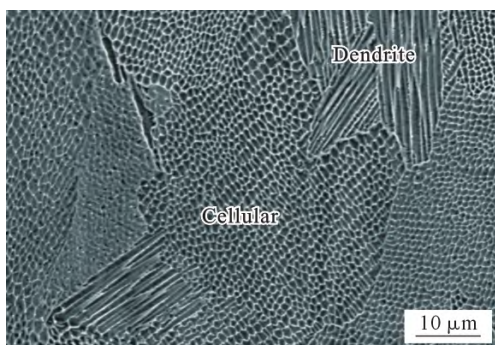


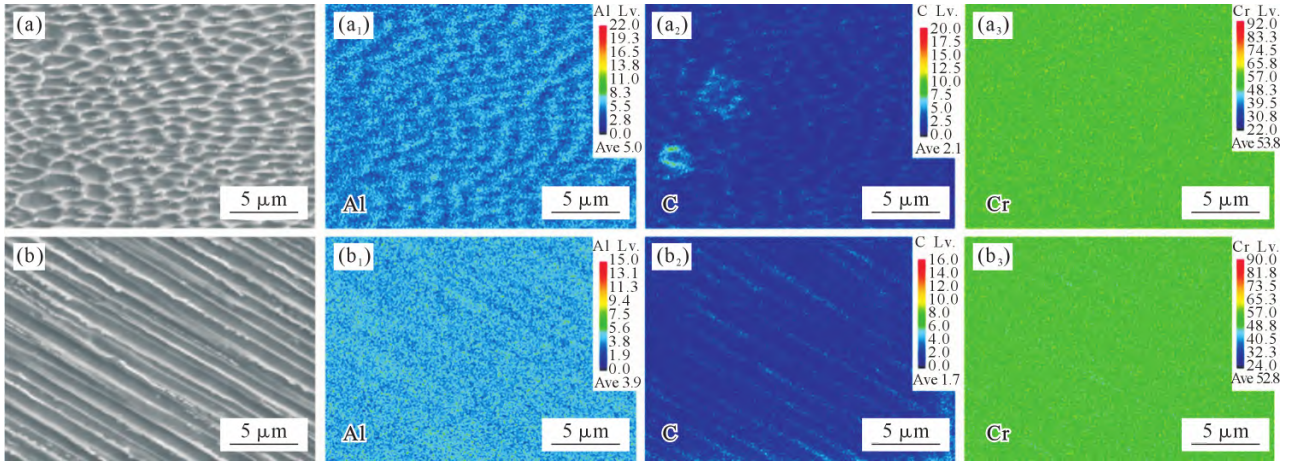
图 4 SLM GH4099 合金微观组织

Fig.4 Microstructure of the SLMed GH4099 alloy

之前的研究推测枝晶间有小尺寸碳化物存在^[9]。综合上文显微组织观察, 本实验沉积态 GH4099 合金内无明显强化相存在, 这是由于在 SLM 成形过程中, 由于极端的冷却速度导致合金化元素固溶于 γ 相基体中, 分布较为均匀, 无法富集析出。

2.2 晶体取向

为分析晶粒结构和取向, 对试样水平和沉积方向进行 EBSD 检测。图 6a 为 GH4099 高温合金试样的反极图(inverse pole figure, IPF), 能够显示出晶粒的分布和尺寸的差异^[10]。从 IPF 中可以观察到合金由沿 $\langle 001 \rangle$ 取向优先生长的柱状晶构成, 这是常见

图 5 SLM GH4099 合金元素分布:(a₁~a₄) 胞状亚结构;(b₁~b₄) 树枝状亚结构Fig.5 Elemental distribution of SLMed GH4099: (a₁~a₄) cellular structure; (b₁~b₄) dendrite structure

的 SLM 成型晶粒取向^[16-18],晶粒尺寸相对差别较大,大尺寸晶粒和小尺寸晶粒同时存在。这是由于 SLM 逐层扫描策略导致先前沉积层中晶粒的连续重熔和快速冷却,熔池中现有晶粒的生长方向受热扩散方向的控制。水平方向能够观察到清晰的熔池结构,熔池中晶粒尺寸较大,边界处则由尺寸较小的等轴晶粒组成,细小的等轴晶包裹着熔池内的粗晶粒,形成可观察的整齐排列的熔池结构。

图 6b 为沉积态 SLM 成形 GH4099 的核平均取向差(kernel average misorientation, KAM)分布图谱。

KAM 值表示材料中某一点与其周围相邻点之间的取向偏差均值,反映了晶体材料在局部区域的取向变化程度,能够定量表征样品中位错的密度和分布状态^[19]。根据 KAM 图,试样中存在沉积态,试样内部存在大量位错缠结,这是 SLM 快速凝固过程中产生的^[20]。在 SLM 过程中,合金受到反复加热和冷却,应力无法通过晶粒生长释放,合金内部大量残余应力聚集,诱导高密度位错生成。观察到水平方向位错

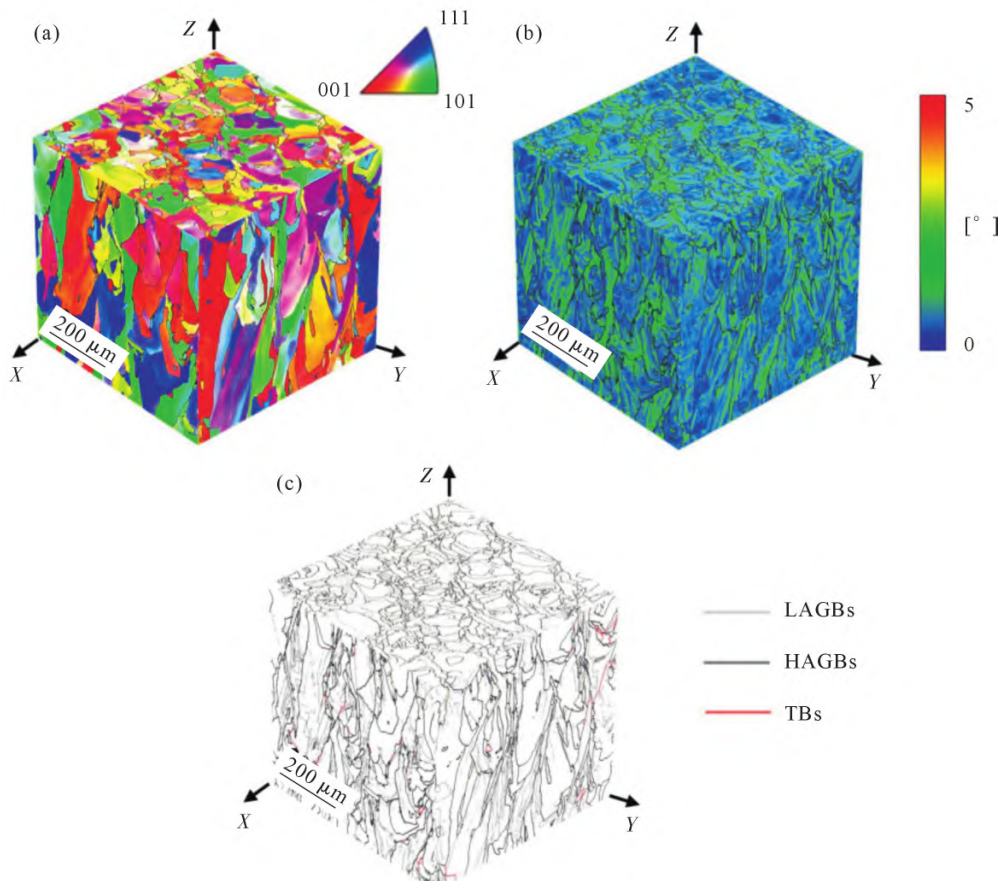


图 6 SLM GH4099 合金 EBSD 分析:(a) IPF 图;(b) KAM 图;(c)大小角度晶界图

Fig.6 EBSD analysis of SLMed GH4099 alloy: (a) IPF map; (b) KAM map; (c) GB map

呈随机分布, 竖直方向位错则沿沉积方向规律分布, 分布状态存在一定各向异性。图 6c 为大小角度晶界图, 可以看出沉积态样品中有大量小角度晶界存在, 其位置与上文位错集中区域相对应。图中含有少量红线表示的 60° 特殊晶界, 说明沉积态试样中有孪晶的存在。根据先前的研究, 孪晶对于合金力学性能具有一定的影响, 但是在本研究中对性能各向异性影响不大^[1]。

2.3 力学性能

对沉积态试样进行多组常温拉伸实验, 图 7 为其水平和沉积方向的拉伸应力应变曲线。试样水平方向屈服强度为 676.7 MPa, 断裂强度为 923.72 MPa, 伸长率为 21.77%; 竖直方向屈服强度为 605.33 MPa, 断裂强度为 852.96 MPa, 伸长率为 32.36%。水平方向的屈服强度和断裂强度都明显高于竖直方向, 而水平方向的伸长率较沉积方向差, 存在明显各向异性。

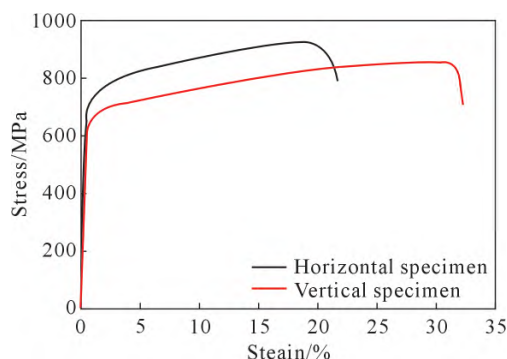


图 7 SLM GH4099 合金工程应力-应变曲线
Fig.7 Tensile engineering strain-stress curves of SLM GH4099 alloy

2.4 断口分析

图 8 为拉伸断口 SEM 图像, 从图中可以看出, 两个方向的断口形貌较为相似, 在低倍镜下观察其中有少量微孔存在, 但由于气孔数量较少, 直径较小, 因此对接头力学性能影响不大。观察到水平方向上存在明显高耸的脊, 而沉积方向拉伸的断口相对更为平坦, 这与试样微观组织形貌相对应。在高倍镜下观察可看到断口中都有韧窝存在, 其中沉积方向部分区域韧窝尺寸明显大于水平方向。

2.5 各向异性分析

对于沉积态 GH4099 合金, 元素分布较为均匀, 无明显存在的强化相和晶间脆性相, 因此其力学性能的各向异性是水平和沉积方向方向上微观组织的差异导致的^[12]。高长宽比的晶粒通常会导致金属材料的塑性变形存在各向异性, 当沿不同方向加载时, 材料的变形行为会有所不同^[20], 但是变形机制保持一致。当沿水平方向拉伸时, 更多的晶界垂直于拉伸方向, 晶界会阻碍位错的运动, 导致应力集中在晶界附近, 裂纹沿晶界扩展。不同方向力学性能差异可以利用 Hall-Petch 公式进行分析^[15]:

$$\sigma = \sigma_0 + k_y / \sqrt{d_m} \quad (1)$$

式中, σ 为抗拉强度; σ_0 为镍单晶的屈服强度; k_y 为晶界常数; d_m 为拉伸方向上的晶粒尺寸。对于镍基高温合金, k_y 的值为 $750 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}^{-1/2}$ ^[22]。由此晶界强化效果可以表示为:

$$\Delta\sigma_s = k_y / \sqrt{d_m} \quad (2)$$

从式(2)中可以看出, 材料屈服强度与拉伸方向晶粒大小呈线性负相关。晶粒大小越小, 则晶界数量越

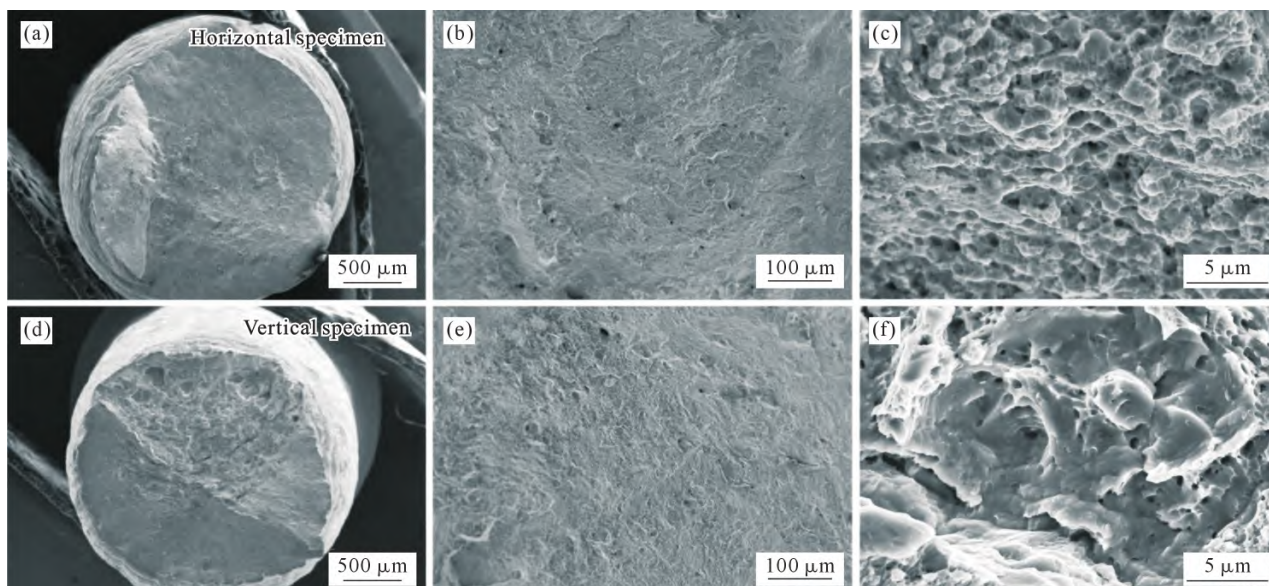


图 8 SLM GH4099 合金拉伸断口 SEM 谱:(a~c) 水平方向;(d~f) 沉积方向
Fig.8 Tensile fracture of the SLMed GH4099 specimen: (a~c) horizontal specimen; (d~f) vertical specimen

多,大量存在的晶界对位错运动起阻碍作用,从而提升合金抵抗塑性变形的能力,使得合金表现出更高的强度和更差的塑性。对于 SLM 成形合金,由于其微观结构由沿沉积方向外延生长的柱状晶粒构成,水平方向的晶界数量更多,因此强度较低。根据统计获得水平和沉积方向平均晶粒尺寸大小分别为 19.84、44.19 μm ,代入公式得到水平方向晶界强化效果为 168.38 MPa,沉积方向为 112.82 MPa,水平方向较沉积方向高 55.56 MPa。

此外,合金强度的方向性差异也可以通过位错强化作用来解释。当内部位错密度较高时,位错运动会发生相互阻碍,使材料强度升高,这种强化机制被称为位错强化。位错强化效果可表述为^[23]:

$$\Delta\sigma_s = \alpha G b \rho^{1/2} \quad (3)$$

式中, α 为常数; G 为基体剪切模量; b 为基体柏氏矢量; ρ 为位错密度。对于 FCC 结构的镍基高温合金, $\alpha=0.2$ ^[24], $G=81 \text{ GPa}$ ^[10], $b=0.256 \text{ nm}$ ^[10]。观察到位错强化效果随位错密度升高而增加,位错强化主要通过几何必要位错(geometrically necessary dislocations, GND)密度表示,可以根据 EBSD 数据获得平均 GND 值,水平方向密度 $\rho_{\text{GND}}=1.1 \times 10^{14}/\text{m}^2$,沉积方向密度 $\rho_{\text{GND}}=0.78 \times 10^{14}/\text{m}^2$,将数据带入公式得到两个方向位错强化效果分别为 43.50、36.63 MPa,得出水平方向位错强化效果优于沉积方向,差值为 6.87 MPa。

根据计算结果,晶界强化与位错强化对沉积态 GH4099 合金不同方向屈服强度贡献计算值的差值为 62.43 MPa,接近于实验值。

沉积态 GH4099 合金塑性各向异性也可以通过 Schmid 因子来进行分析。Schmid 因子是表征合金滑移系启动难易程度的重要参数,其数值与塑性变形能力呈正相关,即 Schmid 因子越高,晶粒滑移越容易发生,合金拥有更好的塑性。对于面心立方(FCC)结构的 GH4099 合金,其主要滑移系为 $\{111\}[110]$ ^[25],图 9a 和 b 分别为沉积态 GH4099 合金在水平和竖直方向上基于 $\{111\}[110]$ 滑移系计算的 Schmid 因子分布,图 9c 为对应的 Schmid 因子累积分布。分析表明,当加载方向沿沉积方向时,高 Schmid 因子区域占比显著高于水平方向,这表明沉积方向变形时滑移系更易激活,从而使合金展现出更好的塑性。

3 结论

(1)沉积态 SLM 成形 GH4099 合金主要由 γ 相基体组成,含有少量碳化物,有元素偏析存在。

(2)晶粒形貌存在各向异性,合金由沿 $\langle 001 \rangle$ 取向优先生长的柱状晶构成,这是成形过程中晶粒沿散热方向生长导致的。柱状晶内存在细小枝晶。

(3)水平方向屈服强度为 676.7 MPa,断裂强度为 923.72 MPa,伸长率 21.77%;竖直方向屈服强度为 605.33 MPa,断裂强度为 852.96 MPa,伸长率 32.36%。水平方向的屈服强度和断裂强度都明显高于竖直方向,而水平方向的伸长率较沉积方向差。

(4)力学性能在水平方向和沉积方向存在各向异性,是晶界强化和位错强化共同作用的结果。

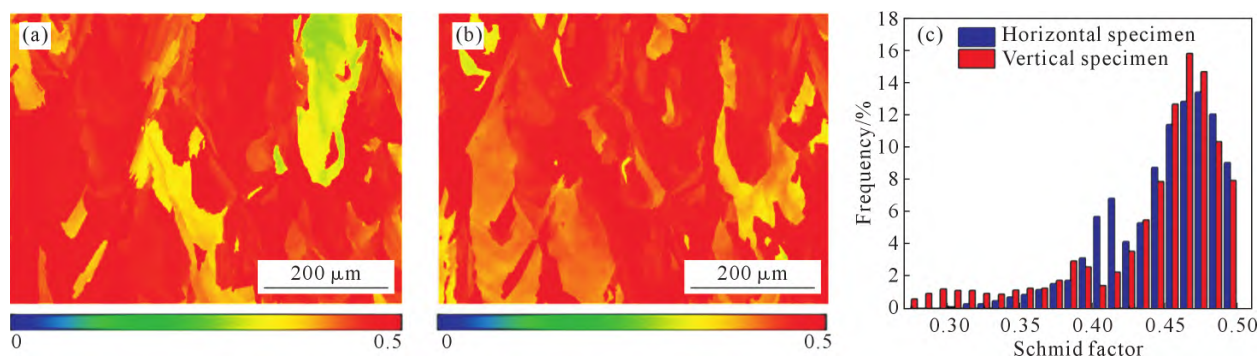


图 9 SLM GH4099 合金 Schmid 因子图:(a) 水平方向;(b) 竖直方向;(c) Schmid 因子累积分布
Fig.9 Schmidt factor mapping of the SLM GH4099 sample: (a) horizontal direction; (b) vertical direction; (c) Schmidt factor distribution

参考文献:

- [1] 吕豪,杨志斌,王鑫,喻春光. 激光增材制造 GH4099 合金热处理后的显微组织及拉伸性能[J]. 中国激光,2018,45(10): 77-82.
LYU H, YANG Z B, WANG X, YU C G. Microstructures and tensile properties of GH4099 alloy fabricated by laser additive manufacturing after heat treatment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 77-82.
- [2] LI S L, CUI H Y, MA L, TAN Y, CUI W, LIU H T, LYU J, LI P T. Microstructure-property gradients in the GH4099 superalloy

fabricated by directed energy deposition and its response to heat treatment[J]. Materials Characterization, 2023, 201: 112974.

- [3] ZHANG H K, LI Y, MA T F, CHANG T X, ZHANG P, FANG X W, HUANG K. Tailoring of nanoscale γ' precipitates and unveiling their strengthening mechanisms in multimodal nickel-based superalloy GH4720Li[J]. Materials Characterization, 2022, 188: 111918.
- [4] ZHANG X Y, WANG S Y, LIU H, LIANG Y F, YI F, LIN J P. Microstructure evolution and mechanical properties of

- additively manufactured Ni-based GH4099 superalloy via hot isostatic pressing and heat treatment [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 903: 146696.
- [5] 李范, 卢强, 余亚东. 激光选区熔化 GH4099 高温合金成形工艺及组织性能[J]. *材料热处理学报*, 2021, 42(9): 98-104.
- LI F, LU Q, SHE Y D. Forming process and microstructure and properties of selective laser melted GH4099 superalloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2021, 42(9): 98-104.
- [6] 赵亚楠, 郭乾应, 刘晨曦, 马宗青, 刘永长. 后续热处理对激光 3D 打印 GH4099 合金微观组织和高温力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2025, 61(1): 165-176.
- ZHAO Y N, GUO Q Y, LIU C X, MA Z Q, LIU Y C. Effects of subsequent heat treatment on microstructure and high-temperature mechanical properties of laser 3D printed GH4099 alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2025, 61(1): 165-176.
- [7] ZHANG J K, WANG X Y, PADDEA S, ZHANG X. Fatigue crack propagation behaviour in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V: Effects of microstructure and residual stress[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 551-561.
- [8] CHANG K, MA L, LI P T, LYU J, YOU X G, ZHANG Y W, TAN Y. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of GH4099 superalloy fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 934: 167813.
- [9] 潘维, 王毅, 扈圣军, 张春来, 韩翼龙. 冷却速率对激光增材 GH4099 合金中显微组织及性能影响研究[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(10): 107-114.
- PAN W, WANG Y, HU S J, ZHANG C L, HAN Y L. Role of cooling rate on microstructure and properties of laser additive manufactured GH4099 alloy [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2024, 16(10): 107-114.
- [10] ZHANG K Q, CHEN C Y, XU S Z, HU T, LI X, CAO Z H, LI X P, PANWISAWAS C, KE L D, WANG J, REN Z M. On the microstructure evolution and strengthening mechanism of GH4099 Ni-based superalloy fabricated by laser powder bed fusion [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 40: 109734.
- [11] WU J J, WANG L Z, AN X G. Numerical analysis of residual stress evolution of AlSi10Mg manufactured by selective laser melting[J]. *Optik*, 2017, 137: 65-78.
- [12] ZHANG X Y, LIANG Y F, YI F, LIU H, ZHOU Q J, YAN Z Y, LIN J P. Anisotropy in microstructure and mechanical properties of additively manufactured Ni-based GH4099 alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 6552-6564.
- [13] LI S, WEI Q S, SHI Y S, ZHU Z C, ZHANG D Q. Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31(9): 946-952.
- [14] DOMASHENKOV A, PLOTNIKOVA A, MOVCHAN I, BERTRANDA P, PEILLONB N, DESPLANQUES B, SAUNIER S, DESRAYAUD C. Microstructure and physical properties of a Ni/Fe-based superalloy processed by selective laser melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 15: 66-77.
- [15] LIU H L, HAN S Y, LAN Y B, ZHAO W Z, ZHANG C L, LI Q L. The effect of direct aging treatment on microstructure and mechanical properties of the GH4099 superalloys produced by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1007: 176493.
- [16] SHI J J, ZHOU Z Q, XU K, ZHOU G Y, ZHOU Z J, LI C P, CHEN G F, LU X G, CAO G H. Effect of heat treatment on microstructure and small punch creep property of selective laser melted Inconel 718 alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 853: 143748.
- [17] KHABOUCI A, VENTURA P, LEYMARIE N, HAZOTTEA A, GERMAIN L. Crystallographic texture and velocities of ultrasonic waves in a Ni-based superalloy manufactured by laser powder bed fusion[J]. *Materials Characterization*, 2020, 169: 110607.
- [18] AMATO K N, GAYTAN S M, MURR L E, MARTINEZ E, SHINDO P W, HERNANDEZ J, COLLINS S, MEDINA F. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(5): 2229-2239.
- [19] NIE Z H, GUO Q Y, ZHAO Y N, MA Z Q, LIU Y C. Temperature dependence tensile behaviors of additively manufactured GH4099 Ni-based superalloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 899: 146464.
- [20] ZHANG H M, PENG J, PAN H J, YAN K T, ZHOU M F, GAO M X, GENG X X, YIN H L. Improved tensile properties of selective laser melted GH4099 superalloy assisted by appreciable work hardening ability[J]. *Materials Characterization*, 2024, 214: 114079.
- [21] VAN CAUWENBERGH P, SAMAEV V, THIJS L, NEJEZCHLEBOVÁJ, SEDLÁK P, IVEKOVIĆA, SCHRYVERS D, VAN HOOR- EWEDER B, VANMEENSEL K. Unravelling the multi-scale structure-property relationship of laser powder bed fusion processed and heat-treated AlSi10Mg[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 6423.
- [22] KOZAR R W, SUZUKI A, MILLIGAN W W, SCHIRRA J J, SAVAGE M F, POLLOCK T M. Strengthening mechanisms in polycrystalline multimodal nickel-base superalloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40: 1588-1603.
- [23] 甄良, 邵文柱, 杨德庄. 晶体材料强度与断裂微观理论[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [24] HOSFORD W F. Slip[M]//HOSFORD W F. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 120-138.
- [25] 雷喆, 柳光祖, 杨峥. 热轧历程对 MGH754 合金板材组织与性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(11): 153-155.
- LEI Z, LIU G Z, YANG Z. Effect of hot-rolling history on microstructure and mechanical properties of MGH754 alloy plate [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(11): 153-155.

(责任编辑: 杨浩雪)