

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.02.07

# 扫描路径对热丝激光修复K4169镍基高温合金 显微组织的影响

康国荣, 石珩, 李春凯\*, 顾玉芬

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:** 采用金相、XRD、SEM、EBSD等检测手段研究非连续纵向与连续横向两种扫描路径对热丝激光修复K4169镍基高温合金显微组织的影响。结果表明:(1)两种扫描路径下修复区显微组织都以柱状树枝晶和少量等轴晶为主,但非连续纵向扫描路径下修复区各位置晶体尺寸均较小;(2)相组成都是 $\gamma$ -Ni基体相且都析出了有害相Laves相,但非连续纵向扫描路径下析出的Laves相的尺寸小、含量少;(3)非连续纵向扫描路径下的二次枝晶间距、晶粒平均尺寸更小,但该扫描路径下修复区小角度晶界含量高,会造成材料的塑性和韧性较差。

**关键词:** 扫描路径; 晶粒尺寸; 二次枝晶间距; 晶界角度; Laves相

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)02-0070-07

## Effect of Scanning Path on Microorganization of Hot Wire Laser Repair K4169 Nickel-based Superalloy

KANG Guorong, SHI Yu, LI Chunkai\*, GU Yufen

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

**Abstract:** The effects of discontinuous longitudinal and continuous transverse scanning paths on the microstructure of K4169 nickel-based superalloy repaired by hot wire laser were investigated by means of metallographic, XRD, SEM and EBSD. The results show that: (1) The microstructure of the repair zone under the two scanning paths is dominated by columnar dendrites and a small amount of equiaxed crystals, but the crystal size at each position of the repair zone under the discontinuous longitudinal scanning path is small. (2) The phase composition is  $\gamma$ -Ni matrix phase and the harmful phase Laves phase is precipitated, but the size of Laves phase is small and the content is small under the discontinuous longitudinal scanning path. (3) The secondary dendrite spacing and the average grain size are smaller under the discontinuous longitudinal scanning path, but the content of small angle grain boundaries in the repair zone is higher under this scanning path, which will cause poor plasticity and toughness of the material.

**Keywords:** Scanning path; grain size; the secondary dendrite spacing; grain boundary angle; laves phase

引用格式: 康国荣, 石珩, 李春凯, 等. 扫描路径对热丝激光修复K4169镍基高温合金显微组织的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(2): 70-76.

**Citation:** KANG Guorong, SHI Yu, LI Chunkai, et al. Effect of Scanning Path on Microorganization of Hot Wire Laser Repair K4169 Nickel-based Superalloy[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(2): 70-76.

## 0 引言

K4169镍基高温合金具有优异的抗氧化、抗腐

蚀以及抗疲劳等性能,被广泛应用于航空领域中的导向叶片、承力机匣等关键热端部件中。这些复杂薄壁构件在铸造的过程中极易出现气孔、裂纹、疏

收稿日期: 2024-04-23 修回日期: 2024-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(52365048); 甘肃省科技重大专项(22ZD6GA008)

作者简介: 康国荣(1998—),男,硕士研究生。E-mail: 2686209646@qq.com。

通讯作者: 李春凯(1991—),男,博士,副研究员,主要从事焊接过程传感及智能控制、焊接方法等研究。E-mail: 15339316249@163.com。

松等缺陷,且由于服役环境恶劣,零件易失效<sup>[1]</sup>。由于高温合金部件的制造成本高,直接丢弃受损的零部件会对企业造成较大的经济损失。因此,对有修复价值的零部件进行修复,对企业降低成本,提高产品利用率意义重大。

热丝激光熔覆技术除了传统激光能量密度高、结合性能好、加工精度高等普通激光的特点之外<sup>[2]</sup>,还具有能量利用率高、填丝效率高和融合比小等优势<sup>[3-4]</sup>,对镍基高温合金修复领域展现出良好的应用前景。

目前,关于激光熔覆镍基合金的研究已有不少报道,但大部分学者主要研究的是激光熔覆的工艺参数、后续热处理工艺对于显微组织及力学性能的影响。盛家锦通过热处理工艺,优化了 Inconel 939 镍基合金的显微组织与力学性能<sup>[5]</sup>。刘奋成等<sup>[6]</sup>研究了不同保护气氛对镍基高温合金显微组织的影响,发现在氩气和空气条件下沉积态以及热处理态的显微组织基本相同;苏国兴等<sup>[7]</sup>通过热丝激光熔覆技术,发现相比于纯激光,热丝激光熔覆时得到的晶粒尺寸小,并且产生的 Laves 相含量更少。Li 等<sup>[8]</sup>利用正交试验研究了激光熔覆过程中工艺参数对熔覆层表明成形的影响,发现线能量密度与单道单层熔覆层的熔高、熔宽和表面成形质量关系密切。而对激光熔覆过程中扫描路径对镍基合金微观组织的影响研究较少。

本文以镍基高温合金零部件出现的体缺陷的修复为研究对象,选用连续横向和非连续纵向两种不同的扫描路径来完成修复工作,通过对比两种工艺下的显微组织来研究扫描路径对修复试样微观组织的影响,以期热丝激光修复镍基合金领域提供一定的理论指导。

## 1 试验及设备

### 1.1 试验原理

图1为热丝激光增材技术的原理:热丝激光修复过程中,丝材保持与基板以45°的角度不断送入激光束作用范围;随着丝材的送进,激光束同时作用于母材与丝材,使得丝材与母材同时开始熔化;当丝材与母材接触后,由于热丝系统回路闭合,丝

材开始产生电阻热,丝材在激光束和电阻热的共同作用下不断熔化,从而完成对试样的修复。为了预防熔池内部出现气孔等缺陷以及熔池被氧化,熔覆过程对熔池以一定角度通入保护气体。

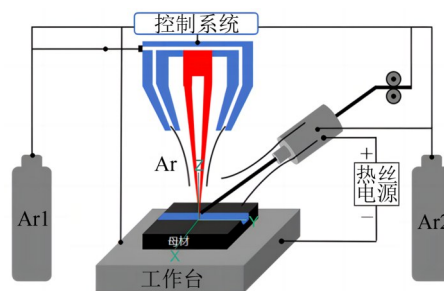


图1 试验原理示意

Fig. 1 Schematic representation of the experimental principle

### 1.2 试验设备

本试验中使用的热丝激光修复设备如图2所示。主要由激光系统、焊丝加热系统、送丝系统、气体保护系统组成。其中激光器采用的是 YLS-4000IPG 光纤激光,最大输出功率为4 kW,光纤直径为600 μm,波长为1.07 μm;焊丝加热系统采用松下 YG400TX4 数字电源,电源恒定功率为5 V,输出最大电流为300 A;焊丝供给系统采用 JRS-400 送丝机构,可实现对  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴的联动;通入的保护气体采用纯度为99.999%的氩气。

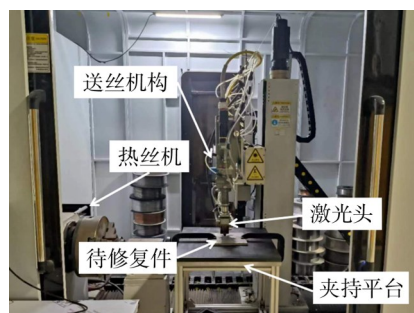


图2 试验系统

Fig. 2 Experimental system diagram

### 1.3 试验材料

本试验中选用尺寸为30 mm×20 mm×6 mm的K4169镍基合金作为母材,直径为1.2 mm的IN 625焊丝作为填充材料,其中K4169与IN 625的化学成分如表1所示。

### 1.4 试验方法

在实际修复镍基高温合金中的体缺陷时,往往要预先打磨去除镍基高温合金中出现缺陷的区域,

表1 K4169和IN 625化学成分表(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of K4169 of IN625 and Inconel718 (wt. %)

元素	C	Al	Nb	Si	Mn	Cr	Mo	Co	Fe	Ti	Ni
K4169	0.052	0.52	4.93	≤0.35	≤0.35	19.03	3.09	0.27	余	0.93	52.95
IN625	0.015	0.08	3.48	0.1	0.01	22.7	8.4	—	0.4	0.19	64.0

然后再通过一定的修复方法来完成对缺陷件的修复。因此,可以通过对基板预制具有一定角度坡口的凹形槽来模拟工件的损伤情况,再通过对该凹形槽的修复来模拟对实际零部件的修复。如图3所示,为本试验所开凹形槽的尺寸,其中槽宽为6 mm,槽深3 mm,坡口角度为15°。图4a是热丝激光修复坡口式损伤槽的示意图。为了探索不同扫描路径对多层多道修复微观组织的影响,本文设计了如图4所示的两种扫描路径,分别是非连续纵向扫描(见图4b)和连续横向扫描(见图4c)。其中,非连续纵向扫描路径下修复一层是通过 $n$ 道沿 $y$ 方向的单道熔覆过程组合完成,相邻两道之间存在一个时长为1 min的散热过程;而连续横向扫描路径下修复一层是通过一个熔覆过程完成,且其长边是通过热丝激光设备沿 $x$ 轴方向熔覆完成;两种扫描路径下修复不同层的时间间隔均设置为2 min。

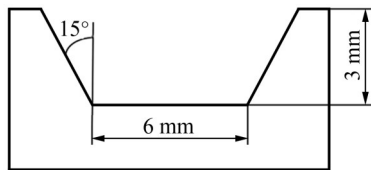


图3 开槽尺寸示意

Fig. 3 Schematic diagram of the slotted dimensions

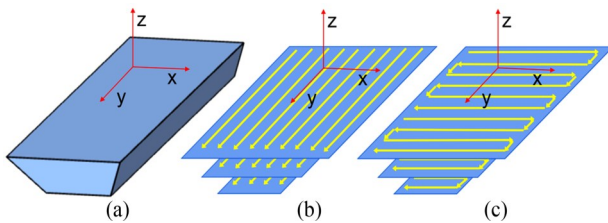


图4 扫描路径示意

Fig. 4 Diagram of slot size

通过前期试验选择出本试验最优工艺参数:激光功率1 700 W,热丝电流40 A,送丝速度12 mm/s,焊接速度10 mm/s,保护气流17 L/min。试验前首先将母材表面的氧化物和油污去除干净,并将其固定在热丝激光熔覆设备搭建的试验平台上。然后通过控制平台将焊丝前端与激光斑点中心对齐。接

着控制面板输入所需工艺参数,打开热丝机将热丝电流调至合适参数,开始试验。修复完成后,对不同扫描方式下得到的修复试样,抛光腐蚀后采用OM、SEM、XRD及EBSD设备分析修复试样的显微组织。

## 2 结果与讨论

### 2.1 金相组织分析

如图5所示,为两种扫描路径下修复区不同位置的金相组织。发现两种扫描路径下母材与熔覆层都达到了冶金结合且没有发现裂纹、气孔等缺陷。两种扫描路径下组织都以柱状树枝晶和少量等轴晶为主且都出现了外延生长的树枝晶。其中,热影响区主要为尺寸相对较小的柱状树枝晶,修复区中部主要为尺寸相对较大的柱状树枝晶,修复区顶部以等轴晶为主。这与三个区域的散热条件和温度梯度是吻合的,修复区底部因为靠近母材,熔覆时熔池温度梯度较大,冷却速率较快,有利于柱状树枝晶的形成;而在熔覆修复区中部时,由于前面熔覆过程的热积累作用,母材和已形成熔覆层的温度增高,导致熔池温度梯度变小,冷却速率变慢,因此形成的树枝晶尺寸相对较大;而在修复区顶部,熔池温度梯度很小,其各个方向温度梯度相差不大且没有下一层激光重熔作用,因此有利于形成等轴晶,这与汪旭东<sup>[9]</sup>观察到的现象一致。但非连续纵向扫描相比于连续横向扫描路径,每一层熔覆过程的热积累作用都相对较小,熔池凝固过程的 $G \times R$ 相对较大,导致修复组织各区域晶粒尺寸都相对较小,表明该扫描路径可以起到细化晶粒的作用。

### 2.2 XRD物相分析

利用XRD对热丝激光修复成形件修复区中部进行物相分析,其结果如图6所示。两种样品的主峰分别位于 $2\theta=44^\circ$ 、 $51^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $91^\circ$ 处,不同扫描路径下的修复区中部均是由单一的 $\gamma$ -Ni相组成,没有检

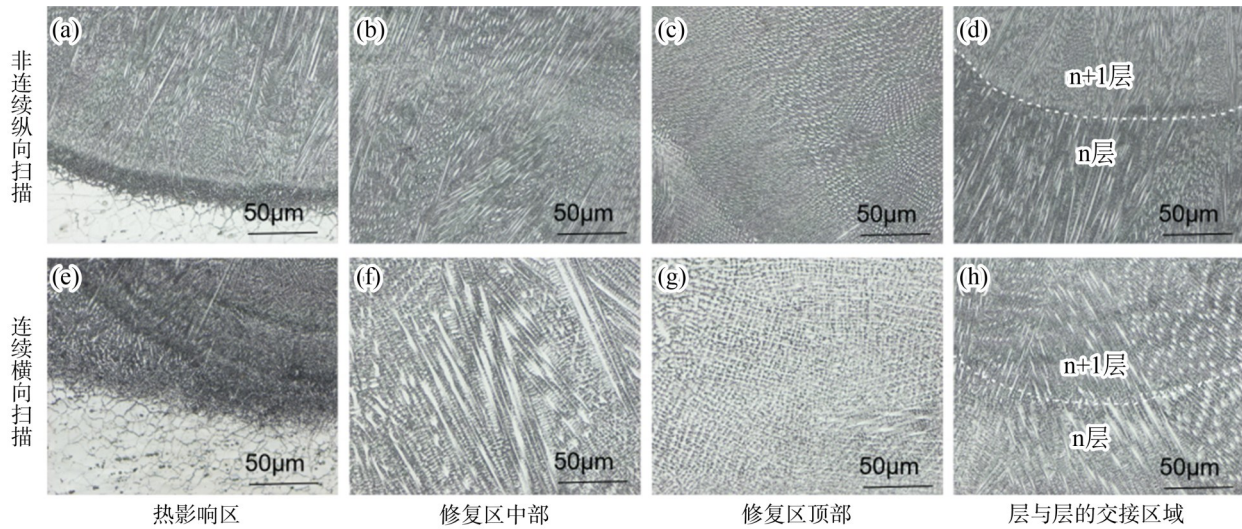


图 5 不同部位金相组织

Fig. 5 Metallographic structure of different parts

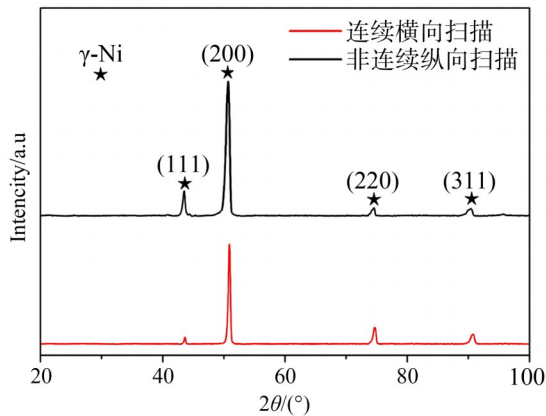


图 6 XRD 衍射图

Fig. 6 XRD diffraction pattern

测到 MC 型碳化物, 这主要与碳化物含量较低、尺寸小有关, 与文献结果相似<sup>[10]</sup>。

### 2.3 SEM 组织分析

在现有研究中, 一般认为 Laves 相的形成是由于高浓度 Nb 含量的偏析所造成<sup>[11]</sup>, 且 Laves 相一般在枝晶间析出, 与基体形成共晶组织。图 7 是对修复区中部枝晶附近进行了 SEM 电镜点扫, 分别对基体组织和析出相进行了成分分析, 如表 2 所示, 点 32 的 Nb、Mo、Ni、Cr、Fe 的含量分别为 27.13、8.40、38.58、14.52、9.95; 点 31 位于基体上, 其 Nb、Mo、Ni、Cr、Fe 含量分别为 2.18、3.66、54.72、20.46、17.77。因此, 确定点 32 是修复区析出在枝晶间的 Laves 相, 点 31 是 Inconel 625 镍基合金的  $\gamma$ -Ni 基体相。

对不同扫描路径下修复区中部进行面扫, 扫描

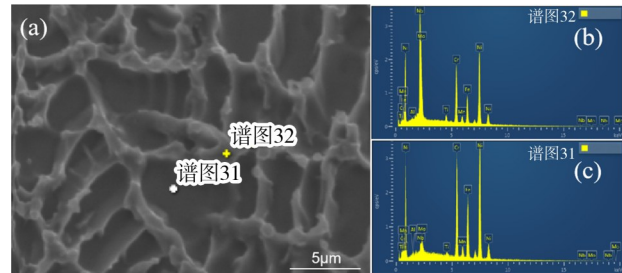


图 7 修复区 SEM 点扫形貌

Fig. 7 SEM point scanning morphology of repair area

表 2 修复区 SEM 点扫元素含量 (质量分数, %)

Table 2 SEM point scanning element content table of repair area (wt. %)

点	Nb	Mo	Ni	Cr	Fe	Ti	Al
31	2.18	3.66	54.72	20.46	17.77	0.54	0.68
32	27.13	8.40	38.58	14.52	9.95	1.25	0.18

结果如图 8 所示, 可以发现连续横向扫描时析出相呈链状和颗粒状, 主要在枝晶间析出, 析出相的含量相对较多; 而在非连续纵向扫描路径下, 析出相主要以颗粒状分布, 析出相含量较少。这主要是因为连续横向扫描时热积累严重, 熔池高温停留时间长, 导致 Laves 相在其形成的温度区间停留时间长, 产生的 Laves 相数量更多、尺寸更大。

不同扫描路径下修复区中部显微组织的二次枝晶间距 (SDAS) 如图 9 所示, 不同扫描路径下二次枝晶间距统计见表 3, 每种扫描路径测量了四组数据并取其平均值来代表该扫描路径下 SDAS 的大小。在连续横向扫描路径下组织的二次枝晶间距

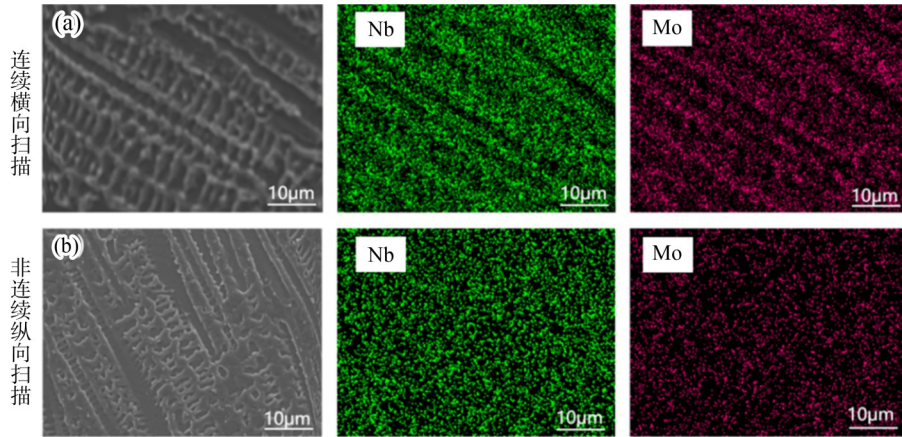
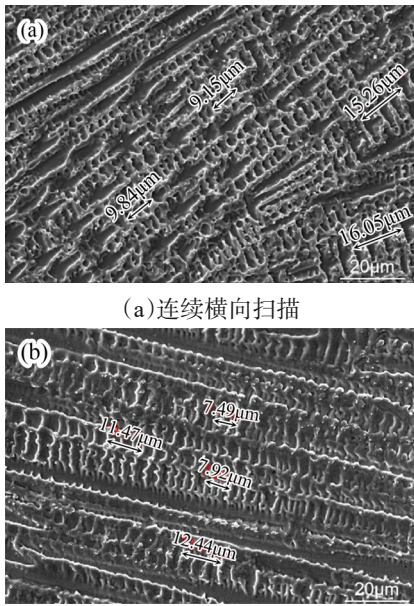


图8 SEM面扫结果

Fig. 8 SEM surface scanning results



(a)连续横向扫描

(b)非连续纵向扫描

图9 二次枝晶间距

Fig. 9 Secondary dendrite arm spacing

较长,测量其平均值为 12.57 μm;而在非连续纵向扫描路径中的二次枝晶间距较短,测量其平均值为 9.83 μm。Kurz 研究发现<sup>[12]</sup>,二次枝晶间距的大小主要受到冷却速率的影响,与冷却速率呈反比例关系。在非连续纵向扫描路径下,由于热积累作用弱,熔池的冷却速率R较快,因此二次枝晶臂短。二次枝晶展臂较小时,可以抑制 Laves 相的析出,减小组织中的元素偏析。

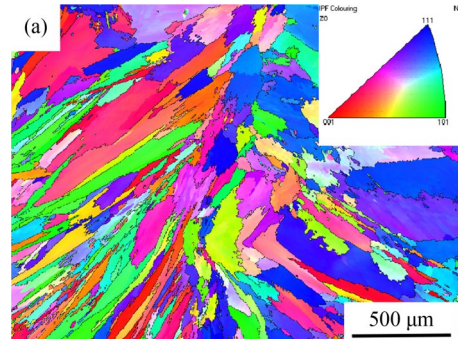
### 2.4 EBSD 组织分析

分别对非连续纵向和连续横向扫描路径下成形件修复区中部进行EBSD分析。如图10所示,不

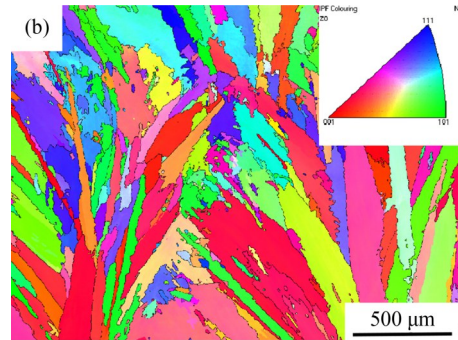
表3 SDAS统计表

Table 3 SDAS Statistics

扫描方式	SDAS-1 /μm	SDAS-2 /μm	SDAS-3 /μm	SDAS-4 /μm	平均值 /μm
连续横向	9.84	9.15	15.26	16.05	12.57
非连续纵向	7.49	7.92	11.47	12.44	9.83



(a)非连续纵向扫描



(b)连续横向扫描

图10 IPF着色图晶粒大小统计

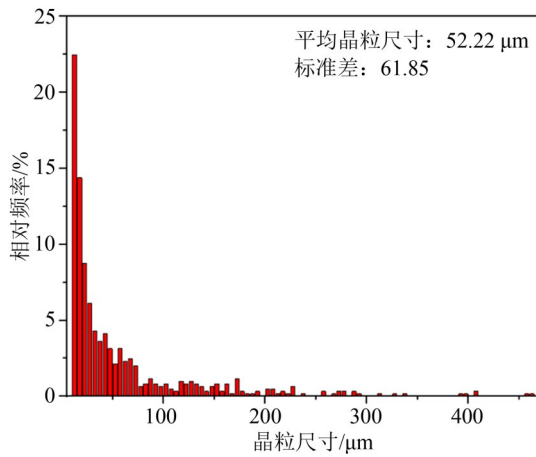
Fig. 10 IPF coloring grain size statistics

同颜色代表晶粒的取向。观察发现,非连续纵向路径下的晶粒各方向生长较为均匀,连续横向扫描路径下向<001>方向生长的晶粒较多。且非连续纵向

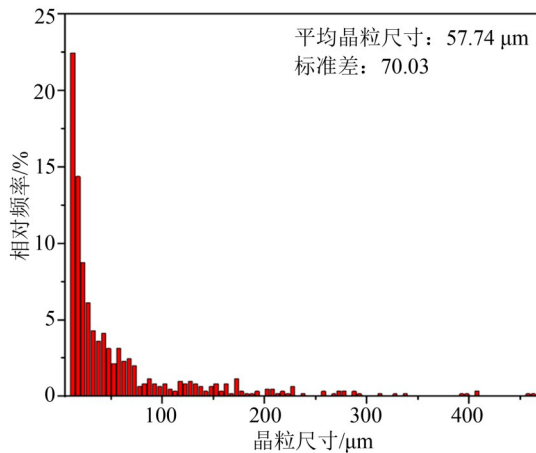
扫描路径下晶粒生长方向是由熔覆层底部以及两侧向熔覆层中心呈放射状生长,这主要是因为非连续纵向扫描时,每一道熔覆层是在上一道熔覆层冷却 1 min 之后才进行熔覆,因此熔覆过程受到上一道熔覆层的热积累作用较小,熔覆层两侧的温度也相对较低,晶粒可以从基板底部和周围同时向熔覆层中心生长。而连续横向扫描时由于热积累作用强,熔池主要通过母材底部进行散热,因此,晶粒生长方向大致于基板垂直。

图 11 为不同扫描路径下修复区中部的晶粒尺寸统计图,非连续纵向扫描路径下的平均晶粒尺寸为 52.22  $\mu\text{m}$ ,连续横向扫描路径下的平均晶粒尺寸为 57.74  $\mu\text{m}$ ,表明非连续纵向扫描路径有着细化晶粒的作用。

图 12 为两种扫描路径下修复区中部晶粒取向



(a)非连续纵向扫描

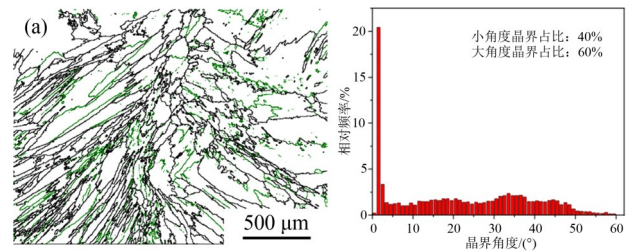


(b)连续横向扫描

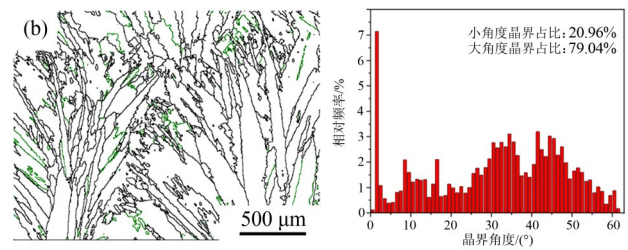
图 11 IPF 着色图晶粒大小统计

Fig. 11 IPF coloring grain size statistics

差角分布与统计,绿色代表小角度晶界,黑色代表大角度晶界。非连续纵向扫描路径下小角度晶界分布较密集。其小角度晶界占比为 40%,大角度晶界占比为 60%;而连续横向扫描路径下小角度晶界含量分布较为稀疏,小角度晶界占比为 20.95%,大角度晶界占比为 79.04%。因此,非连续纵向扫描路径下组织的位错密度更高,代表该区域的强度较高,但也代表储存的应力较大,对材料的塑性和韧性的影响较大。



(a)非连续纵向扫描



(b)连续横向扫描

图 12 修复区中部晶粒取向差角统计

Fig. 12 Statistical diagram of grain misorientation angle in the middle of the repair area

### 3 结论

(1)热丝激光熔覆工艺可以实现对 K4169 镍基高温合金件体损伤的高质量修复,非连续纵向和连续横向扫描都可以得到母材与熔覆层冶金结合良好、无微观裂纹、气孔等缺陷的组织。两种扫描路径下修复区不同位置组织有着相似的特征:修复区底部及中部主要由树枝晶组成,顶部主要由等轴晶组成。但非连续纵向扫描路径下的树枝晶与等轴晶尺寸更小,热影响区更窄。

(2)两种扫描路径下的物相都为  $\gamma$ -Ni 基体相,且都会析出有害相 Laves 相,但非连续纵向扫描路径下由于修复过程热积累作用弱,熔池高温停留时间短、冷却速率快,产生的 Laves 相尺寸小、含量少。

(3)非连续纵向扫描相比于连续横向扫描,晶粒平均尺寸减小了 $5.52\ \mu\text{m}$ ,二次枝晶间距减小了 $2.74\ \mu\text{m}$ ,小角度晶界占比增加了19.05%。

#### 参考文献:

- [1] 许章华,谢志雄,康茂东,等. K4169高温合金铸件铸造缺陷修复及疲劳性能研究[J]. 材料导报, 2021(22):22115-22120.  
XU Z H, XIE Z X, KANG M D, et al. Study of Casting Defect Repair and Fatigue Performance of K4169 Superalloy Casting [J]. Materials Reports, 2021 (22) : 22115-22120.
- [2] 李丛辰,陈文静,向超,等. EA4T钢表面激光熔覆Fe314合金熔覆层的微观组织及性能[J]. 电焊机, 2016,46(05):73-77.  
LI C C, CHEN W J, XIANG C, et al. Microstructure and properties of Fe314 alloy cladding layer by laser cladding on EA4T steel[J]. Electric Welding Machine, 2016,46(05):73-77.
- [3] Salminen A. The filler wire-laser beam interaction during laser welding with low alloyed steel filler wire[J]. Mechanika, 2010, 84(4):67-74.
- [4] Nurminen J, Riihimaki J, Nakki J. Hot-wire cladding process studies[C]//ICALEO, 2007:947-952.
- [5] 盛家锦. 激光熔覆IN939镍基高温合金裂纹控制及热处理研究[D]. 浙江:浙江工业大学, 2021:51-64.  
SHENG J J. Study of Crack Control and Heat Treatment of Laser Cladded IN939Nickel-based Superalloy [D]. Zhejiang: Zhejiang University of Technology, 2021: 51-64.
- [6] 刘奋成,林鑫,杨高林,等. 不同气氛激光立体成形镍基高温合金 Inconel 718 的显微组织和力学性能[J]. 金属学报, 2010,46(09):1047-1054.  
LIU F C, LIN X, YANG G L, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Laser Solid Formed Nickel base Superalloy INCONEL 718 Prepared in Different Atmospheres [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46 (09):1047-1054.
- [7] Su G X, Shi Y, Li G, et al. Improving the deposition efficiency and mechanical properties of additive manufactured inconel 625 through hot wire laser metal deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023,322:118175.
- [8] Li P, Yang T P, Li S, et al. Direct laser fabrication of nickel alloy samples [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45 (11) : 1288-1294.
- [9] 汪旭东. 激光功率对增材制造GH3039合金组织和力学性能影响[D]. 江西:南昌大学, 2022:25-33.  
WANG X D. Effect of Laser Power on the Structure and Mechanical Properties of Additively Manufactured GH3039 Alloy [D]. Jiangxi: Nanchang University, 2022:25-33.
- [10] Xu F J, Lv Y H, Liu Y X, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2013, 29:480-488.
- [11] Tanvir A N M, Ahsan M R U, Ji C W, et al. Heat treatment effects on Inconel 625 components fabricated by wire + arc additive manufacturing (WAAM)—part 1: microstructural characterization [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2019, 103:3785-3798.
- [12] Kurz W, Fisher D J. Dendrite growth in eutectic alloys: the coupled zone [J]. International Materials Reviews, 1979(5-6):177-204.