

超声振动方向对激光定向能沉积 Inconel 718 性能影响研究

范伟光, 李燕乐*, 牛家亭, 戚小霞, 潘忠涛, 李剑峰, 李方义

(山东大学 a.机械工程学院 b.高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061)

摘要: **目的** 面向激光定向能沉积表面改性及再制造发展需求, 揭示超声振动方向对激光定向能沉积 Inconel 718 零件的影响机制, 为超声辅助激光定向能沉积高质量成形提供参考。 **方法** 开展多方向超声振动辅助激光定向能沉积 Inconel 718 零件试验, 结合原位熔池监测技术, 研究沉积方向、搭接方向和扫描方向超声振动对熔池流动行为、微观结构和力学性能的影响。 **结果** 不同方向超声振动显著影响了熔池的动态流动行为, 其中搭接方向超声振动使熔池润湿面积提高了 86.4%, 并且形状更为规则, 拖尾现象得到改善。微观组织细化方面, 扫描方向振动效果最佳, 晶体直径细化了 46.9%, 水平方向的晶体等轴晶转变优于沉积方向, 而在沉积方向振动下, Laves 相点球化和减少最为明显。相较于对照组的显微硬度 210.4HV0.2, 添加沉积、搭接和扫描方向超声振动后分别提高到了 232.5HV0.2、230.9HV0.2 和 233.9HV0.2, 变化趋势与晶体直径变化趋势基本一致。水平方向超声振动影响下, 特别是扫描方向的超声振动在提高材料强度的同时, 还在一定程度上保持了材料的延展性; 在搭接方向上, 超声振动辅助显示出较好的各向异性消除能力, 获得了优异的硬度、强度和塑性匹配。 **结论** 不同方向超声振动, 通过不同方向的惯性力和热流改善了熔池的动态流动性, 其中搭接方向超声振动在扩大熔池润湿面积和改善熔池动态形状方面具有优异的综合能力。由于超声强度方向性传播衰减和引起不同的声压梯度, 微观组织细化和 Laves 相的细小点球状消减分别在扫描方向和沉积方向上最为显著, 这些变化引起了显微硬度和拉伸性能的相关性提升。超声振动还均衡了材料的力学性能, 提高了抗拉强度、屈服强度和延展性, 尤其在搭接方向上, 显示出较好的各向异性消除能力。可根据具体需求目标, 选用相应的超声振动方向或者复合使用, 以获得优异的 Inconel 718 零件熔池流动、微观形貌和力学性能匹配。

关键词: 激光定向能沉积; Inconel 718 合金; 超声振动方向; 熔池流动; 微观结构; 力学性能

中图分类号: V261.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)13-0044-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.13.005

Effect of Ultrasonic Vibration Direction on Properties of Laser Directed Energy Deposition of Inconel 718

FAN Weiguang, LI Yanle*, NIU Jiating, QI Xiaoxia, PAN Zhongtao, LI Jianfeng, LI Fangyi

(a. School of Mechanical Engineering, b. Key Laboratory of Efficient and Clean
Machinery Manufacturing, Shandong University, Jinan 250061, China)

收稿日期: 2024-04-30; 修订日期: 2024-06-29

Received: 2024-04-30; Revised: 2024-06-29

基金项目: 国家自然科学基金 (52275495)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52275495)

引文格式: 范伟光, 李燕乐, 牛家亭, 等. 超声振动方向对激光定向能沉积 Inconel 718 性能影响研究[J]. 表面技术, 2024, 53(13): 44-54.
FAN Weiguang, LI Yanle, NIU Jiating, et al. Effect of Ultrasonic Vibration Direction on Properties of Laser Directed Energy Deposition of Inconel 718[J]. Surface Technology, 2024, 53(13): 44-54.

*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: Inconel 718, a prominent nickel-based superalloy, finds widespread use in the aerospace industry due to its exceptional mechanical properties at elevated temperature. However, the pursuit of enhancing these properties further through LDED necessitates an understanding of the influence exerted by ultrasonic vibration on the process. To address this need, a comprehensive study was undertaken with the objective of elucidating the impact mechanism of ultrasonic vibration direction on the LDED of Inconel 718 components. The research aims to furnish a reference framework for ultrasound-assisted high-quality formation within the LDED domain. Methodologically, the study involved conducting experiments on LDED of Inconel 718 parts assisted by multidirectional ultrasonic vibration. The effects of ultrasonic vibration applied in distinct directions—namely, the building direction, overlapping direction, and scanning direction—on the molten pool's flow behavior, microstructural development, and mechanical properties were meticulously investigated. This was achieved through the synergistic integration of in-situ molten pool monitoring technology. The experimental outcomes were revealed. It was observed that the application of ultrasonic vibration in varied directions significantly perturbed the dynamic flow within the molten pool. Notably, the introduction of overlapping directional ultrasonic vibration resulted in an impressive 86.4% augmentation in the wetting area of the molten pool, which also transitioned to a more geometrically regular shape, effectively mitigating the trailing effect typically associated with the process. Furthermore, the scanning direction vibration proved to be the most efficacious in terms of microstructure refinement, achieving a notable reduction of 46.9% in crystal size. The transformation to equiaxed crystals was found to be superior in the horizontal plane compared with the building direction. Concurrently, the Laves phase particles experienced significant spheroidization and a reduction in size under the influence of building direction vibration. Microhardness testing corroborated these findings, indicating a substantial increase from the control group's 210.4HV0.2 to 232.5HV0.2, 230.9HV0.2, and 233.9HV0.2 in the building, overlapping directional, and scanning directions, respectively. The trends in microhardness were congruent with the changes in crystal size, signifying a direct correlation between the two parameters. Additionally, the study illuminated the nuanced influence of ultrasonic vibration in the horizontal plane. The scanning direction, in particular, not only enhanced the material's strength but also preserved its ductility to a commendable extent. The overlapping direction of ultrasonic vibration demonstrated an adept ability to eliminate anisotropy, culminating in a remarkable balance of hardness, strength, and plasticity. In conclusion, the study underscored the utility of ultrasonic vibration in different directions to modulate the dynamic fluidity of the molten pool through distinct inertial forces and thermal flow alterations. The tangential application of ultrasonic vibration emerged as having an exceptional comprehensive capability in enlarging the wetting area of the molten pool and refining its dynamic shape. The directional propagation attenuation of ultrasonic intensity and the concomitant acoustic pressure gradients played pivotal roles in the pronounced crystal refinement and Laves phase spheroidization observed in the scanning and building directions, respectively. These transformations led to correlated enhancements in microhardness and tensile properties. Ultrasonic vibration also served to equalize the mechanical properties, bolstering tensile strength, yield strength, and ductility of the material, with a particularly pronounced ability to eliminate anisotropy in the overlapping direction. Depending on the specific requirements at hand, applications could selectively employ the appropriate directional ultrasonic vibration or a strategic combination thereof to achieve an optimal match of molten pool fluidity, microstructural morphology, and mechanical properties in Inconel 718 components. The insights gleaned from this study are not only instrumental in advancing the state-of-the-art in LDED but also hold significant implications for a broader field of materials science and manufacturing technology. By harnessing the power of ultrasonic vibration, researchers and engineers can now more precisely manipulate the microscopic attributes of materials, thereby opening up new avenues for innovation and optimization in industries ranging from aerospace to automotive and beyond.

KEY WORDS: laser directed energy deposition; Inconel 718 alloy; ultrasonic vibration direction; melt pool flow; microstructure; mechanical properties

近年来, Inconel 718 高温合金由于出色的抗热腐蚀、抗氧化、抗疲劳和抗蠕变等性能, 成为能源动力等工业领域的重要结构材料, 特别在航空发动机热端零部件应用广泛。激光定向能沉积 (Laser Directed Energy Deposition, LDED) 是使用高能量密度光束使

激光定向能沉积材料在基板上形成熔合的一种先进制造方式, 其能实现特定位置增材、合金设计以及复杂几何形状的高附加值产品制造^[1-5]。LDED 由于加工过程急热骤冷的特点, 其加工出的零件可能出现结合效果差、尺寸精度低、表面粗糙度大、内部缺陷及

脆性相生长等问题,影响零件的力学性能,甚至导致变形、开裂,影响零件的服役可靠性^[4,6]。为了减少这些问题,大量学者通过调整激光参数^[7]、优化沉积策略^[7-8]、加入强化相^[9-10]和热处理^[11-13]等措施对 IN718 合金零件的显微组织和力学性能进行了研究,以提高零件的组织性能和服役性能。

超声振动辅助激光定向能沉积 (Ultrasonic Vibration-Assisted LDED, UV-A LDED) 工艺通过超声场、机械振动和金属熔体相互作用诱导产生的超声空化、声流搅拌和剧烈的机械效应等非线性影响,可以控制熔化和凝固过程,从而调整沉积材料的微观结构和性能。经过大量专家学者的研究,该工艺已被证明是改善 LDED 的有效制造方法^[14-18]。姚喆赫等^[19-21]围绕超声振动辅助激光加工,较为全面地研究了超声对熔池润湿行为、超声振动方向改善加工零件表面形貌以及对多维度超声振动辅助激光复合表面改性。Cong 等^[22]提出了一种新型超声振动辅助激光近净成形工艺,研究了该工艺对沉积零件的几何形状、粉末利用效率、表面粗糙度等的影响,并且评估了其力学性能,整体进行了较为完备的基础研究。超声振动有减少沉积材料内部的微孔和成分均匀性能力, Ning 等^[23-24]先后研究了超声振动辅助激光近净成形 17-4 PH 钢零件和 IN718 合金零件,研究结果表明,在超声振动诱导的声空化和声流效应作用下,微孔等缺陷减少,零件组织致密化和成分均匀化。对于晶粒形状均匀性方面,在各种具有超声振动辅助沉积合金中,除了晶粒细化,关于柱状晶向等轴晶演化 (CET) 也有研究。Todaro 等^[25]研究发现,超声波通过降低熔池温度梯度来增加凝固过程中的结构过冷量,从而创造一个有利于颗粒成核、生长和生存的环境,实现了有效的晶粒细化和 CET。总之,目前开展的研究为超声振动辅助增材制造对微观缺陷和晶粒结构的有效控制的可能性提供了证据。

目前针对 UV-A LDED 的超声振动参数等方面进行了较为全面的探索。Wang 等^[26]研究发现,随着 UV-A 增材制造超声频率的增加,晶粒尺寸减小, Laves 相由长条柱状变为颗粒状,黏接界面变得更光滑,孔隙率增加,显微硬度增加,弹性模量降低。Ning 等^[27]研究了超声振动频率对热力学和微观结构的影响,研究发现,熔池内的峰值温度与超声频率呈正相关,但较低频下温度分布更均匀,有更稳定的单层沉积热历史,空化效应程度适中,一定程度上有利于孔隙率的降低,但晶粒细化程度较差。Zhu 等^[28]研究了振幅等振动参数对熔融金属过冷度和成核速率的影响,验证了 UV-A LDED 可实现晶粒结构细化,特别是在大超声振幅下,平均晶粒尺寸最小,且显微硬度最大。此外, Todaro 等^[29]在高强度超声对金属三维打印过程中晶粒结构的控制等研究中发现,随着传播距离的增大,超声振动的声强峰值下降到 0,当构建高度达到

声波波长时返回到峰值,产生所需的空化结构细化是间歇性的,因此构件的几何特征也是影响超声振动作用的重要因素。上述研究表明^[26-29],超声振动参数等对材料加工过程、成形过程以及整合过程中超声振动引起的非线性效应 (包括空化和声流) 有很大影响。

在材料熔化、沉积层成形以及最终凝固过程中超声振动引起的非线性效应 (包括空化和声流) 有很大影响,但作为超声振动的基本参数之一,现有研究对于超声振动方向如何细致地动态调控定向能沉积过程中熔池流动行为、微观结构和力学性能仍缺乏全面和深入的理解。本研究开展了多方向超声振动辅助激光定向能沉积 (UV-A LDED) 试验,并结合了熔池原位监测技术,探究了超声振动方向 (包括沉积方向,扫描方向和搭接方向) 对熔池流动特性、显微结构以及机械特性的影响。试验结果为进一步提高 UV-A LDED IN718 合金零件制造质量和服役性能提供理论指导。

1 试验

1.1 方案

本研究使用自主开发的多维振动辅助激光定向能沉积系统,其硬件结构如图 1 所示。该系统主要包括激光定向能沉积系统 (LOM2170, 由 LATEC 提供) (见图 1a)、熔池原位监测系统 (见图 1b) 以及三维高频振动工作台 (见图 1c)。试验工艺参数见表 1。所用基体材料为 45# 钢,尺寸为 80 mm×50 mm×20 mm。在进行 LDED 前,打磨表面并擦除表面油污。激光定向能沉积粉末为 IN718 镍基高温合金粉末,粉末粒度为 53~106 μm ,保证粉末洁净干燥,基体材料和粉末的化学成分见表 2。粉末采用同轴供给方法以 S 形路径沉积到基板上,多道沉积路径如图 2 所示。本研究以未施加超声振动、沉积方向超声振动、搭接方向超声振动和扫描方向的超声振动为变量,分别设计 4 组单层多道沉积试验和 4 组多层多道沉积试验,用于观察微观结构和测量材料的显微硬度、室温拉伸性能。三维超声高频振动台可实现垂直和水平振动,由其控制面板控制振动频率 (20~35 kHz) 和幅度 (0~15 μm),振幅通过功率比调节,超声施加于振动平台,从基体底部传递至熔池。试验过程中,采用基于同轴 CCD 相机的熔池原位监测系统进行熔池图像特征数据提取、保存。使用自主开发算法模型进行熔池图像标定及处理,结合 Canny 边缘检测^[30]和基于阈值划分的轮廓检索,获得熔池的面积、周长、长度和宽度特征数据。在本文中,如图 1d 所示,定义“沉积方向 (Building Direction, BD)”与重力方向平行,“扫描方向 (Scanning Direction, SD)”与激光扫描方向平行,“搭接方向 (Overlapping Direction, OD)”在水平面中,并与搭接方向平行。

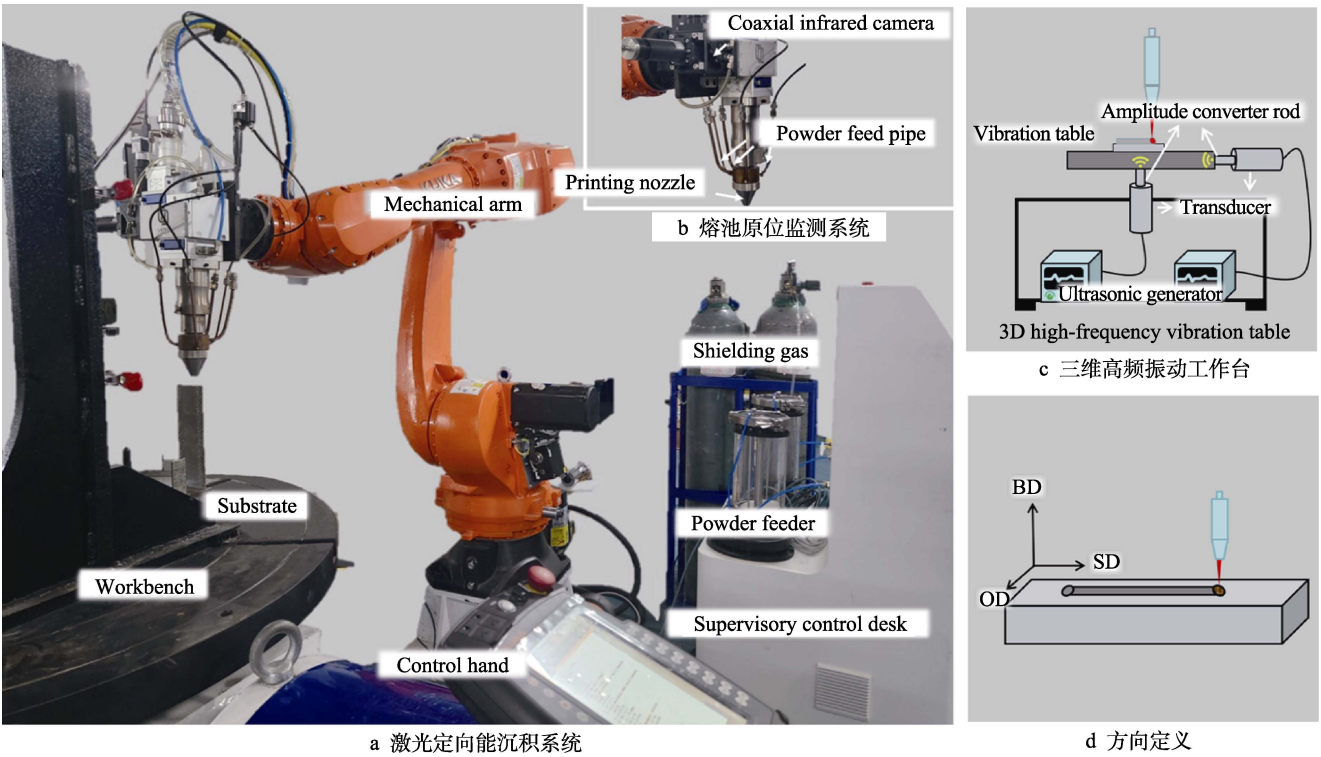


图 1 多维振动辅助激光定向能沉积系统

Fig.1 Multi-dimensional vibration-assisted laser directed energy deposition system: a) laser directed energy deposition system; b) in-situ monitoring system of molten pool; c) three-dimensional high-frequency vibration table; d) definition of direction

表 1 多方向超声振动辅助激光定向能沉积 IN718 合金试验参数

Tab.1 Parameters of multi-directional ultrasonic vibration-assisted laser directed energy deposition of IN718 alloy						
Laser power/ W	Cladding speed/ (mm·s ⁻¹)	Powder rate/ (g·min ⁻¹)	Overlap rate/ %	Spot diameter/ mm	Ultrasonic frequency/ kHz	Amplification/ μm
1 400	10	11.1	35.7	2.8 (Negative defocus)	16	About 7.5

表 2 45#钢和 IN718 镍基高温合金的化学成分

Tab.2 Percentage of chemical elements of 45# and IN718 nickel-based high temperature alloy									
Sample	C	Si	Mn	Ni	Cr	Co	Nb	Mo	Fe
45#	≤0.45	≤0.20	0.54	0.01	0.03	—	—	—	Bal.
IN718	≤0.08	—	—	51.9	19.39	≤0.01	5.23	3.11	Bal.

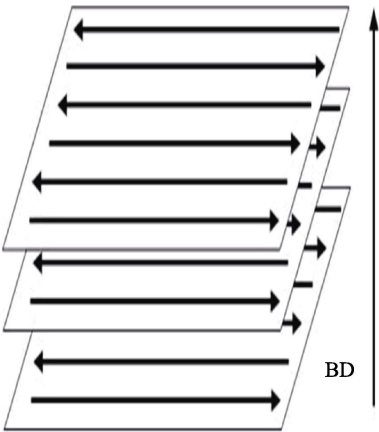


图 2 多道沉积路径

Fig.2 Multi-pass deposition path

1.2 测试方法

试验结束后, 采用电火花线切割机切割出试样。试样经抛光、清洗后, 分 2 批次分别用王水 (HCl : HNO₃ 的体积比为 3 : 1) 和 CuCl₂ 溶液 (按 5 g CuCl₂ 粉末溶解到 100 mL 浓盐酸和 100 mL 酒精混合溶液中的比例配制) 进行腐蚀, 最后采用光学显微镜观察金相结构。用 JSM-7610F 扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM, JEOL, Japan) 来表征样品的微观形貌和相组成。在 15 kV 加速电压下, 用 X 射线光谱 (EDS) 分析样品表面的微观结构和元素分布。使用维氏显微硬度计测量沉积层截面不同深度的显微硬度, 加载载荷为 200 g, 加载保持时间为 10 s。

为提高测量精度,采用沿沉积层横截面顶部、中部、底部 3 个位置进行二维等距取点测试方式,同一水平高度隔 0.2 mm 测量 4 个点,每个试样一次共测 12 个点,并计算平均硬度作为该截面的显微硬度大小。

采用如图 3a 所示顺序,在沉积层中间区域沿 BD 方向取 OD 方向和 SD 方向拉伸试样各 2 片,共取 8 组 16 件拉伸试样,其主要加工尺寸如图 3b 所示。使用 QJ-211S 液压拉伸试验机进行室温拉伸试验,为减小测量误差,每组 2 条拉伸试验曲线,通过计算求均值拉伸曲线,记为该组的拉伸试验曲线。

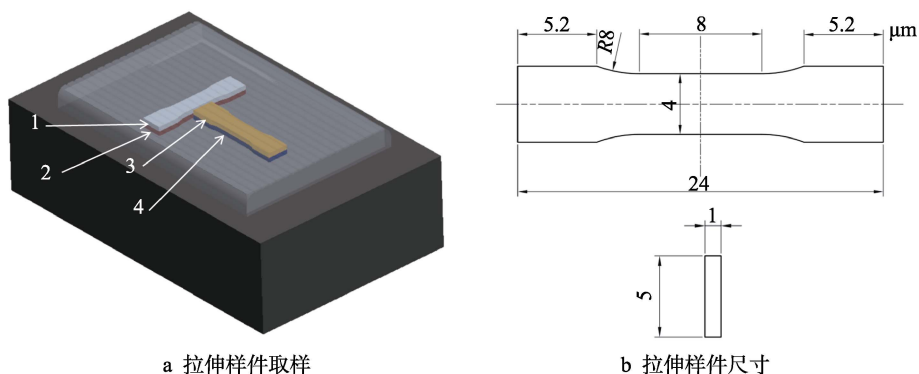
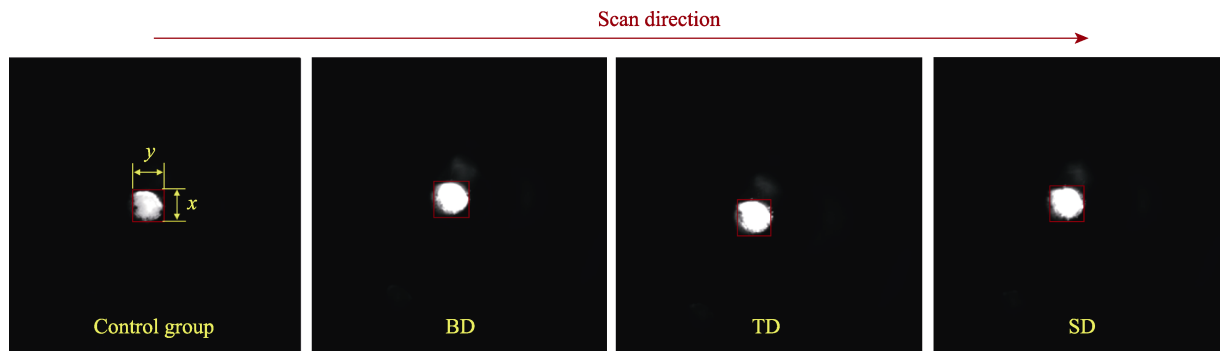
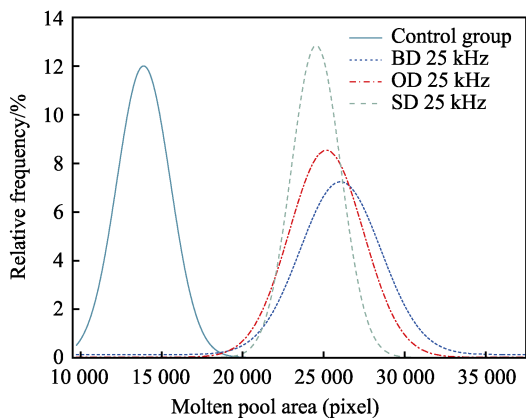


图 3 拉伸试样取样说明及其尺寸

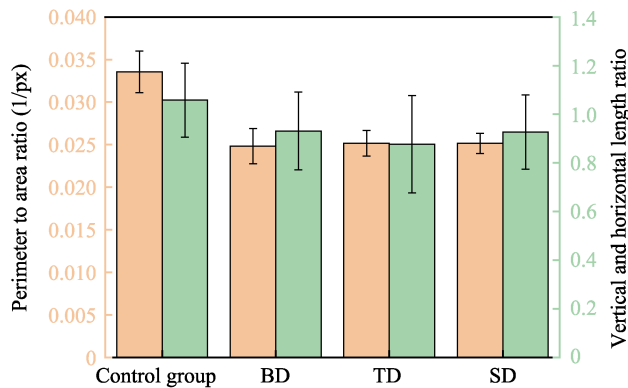
Fig.3 Illustrative drawings of tensile sample sampling and multi-channel deposition paths: a) sampling diagram of tensile samples; b) dimensional drawing of tensile samples



a 不同振动方向下LDED过程熔池形貌



b 超声振动方向对LDED过程熔池面积的影响



c 超声振动方向对LDED过程熔池形状的影响

图 4 UV-A LDED 过程熔池图像监测

Fig.4 UV-A LDED process molten pool image monitoring: a) LDED process molten pool morphology in different vibration directions; b) effect of ultrasonic vibration direction on LDED process molten pool area; c) effect of ultrasonic vibration direction on LDED process molten pool shape

动方向下 UV-A LDED 对熔池面积的影响进行频数统计、绘制直方图后的高斯拟合分析如图 4b 所示。结果表明,相较于未施加超声 LDED 的熔池面积,一维超声振动的引入,使熔池面积增大,BD 组增大了 84.0%,OD 组增大了 86.4%,而 SD 组增大了 79.6%。在不同方向的超声振动辅助下,液态金属向四周进行了不同程度的润湿面积扩展。从拟合的高斯曲线的形状可以看出,对照组在 LDED 过程中,熔池面积的过程动态稳定性较好,而在超声振动周期作用下,BD、OD 组熔池动态过程面积的稳定性下降,而 SD 组熔池动态过程面积的均匀性和稳定性有所提升。结合图 4c 对 LDED 过程中熔池形状情况进行的定量分析,本研究以 LDED 过程中熔池的周长与面积之比和熔池纵向和横向长度之比作为衡量熔池形状规则性^[31]和熔池拖尾现象^[19]的定量指标。由图 4c 可知,施加超声后,熔池的周长和面积之比有所减小,进而说明在不同方向超声振动的影响下,熔池边界的不规则性得到不同程度的改善,其中 BD 组的改善效果最为明显。观测相机采集结果,引入超声振动后,熔池的横向长度和纵向长度均逐步增大。在无超声作用下,熔池面积较小,纵横比较大,熔池形状较为细长,反应熔池拖尾较长^[19];在超声作用下,熔池流动加剧,熔融区域扩大,纵横比较小,熔池过程动态横向扩展能力较强,反应了超声振动的引用,有效减缓了熔池拖尾过长带来的不良影响,OD 组改善效果最为明显。

方向性超声振动对熔池流动行为的影响主要集中在高频振动的机械效应,与不同方向的 UV-A 引入 LDED 熔滴边界和熔池熔合边界的额外作用力的方向和稳定性有关,如图 5 所示。无超声时,熔池的气液固三相边界在边界力的作用下处于平衡状态;引入超声振动后,由于超声振动在液滴固液边界处产生动量传递层,引发了使液滴向三相边界外侧运动的额外作用力,进而破坏了初始平衡状态,提升了熔池在基板上的润湿效果。BD 方向超声振动引起的额外作用

力与新的三相边界力达到平衡,该平衡可表示为:

$$F + \sigma_{lg} \sin \theta = \sigma_{sl} \sin \alpha \quad (1)$$

OD 和 SD 方向超声振动引起的额外作用力与新的三相边界力达到平衡,该平衡可表示为:

$$F = \sigma_{lg} \cos \theta + \sigma_{sl} \cos \alpha - \sigma_{sg} \quad (2)$$

式中: σ_{lg} 为液-气界面表面张力; σ_{sl} 为固-液界面表面张力; σ_{sg} 为固-气界面表面张力; F 为由超声振动引起的额外作用力; θ 为动态接触角; α 为固-液界面表面张力与基体平面的动态夹角。

BD 方向的熔池扁平化发展主要取决于基板高频上下运动带来的惯性,超声振动引起的额外作用力 F 的大小远大于其他驱动力的大小。由图 5b、c 分析可得, BD 方向相较于水平方向的 UV-A 引入的水平额外作用力远小于 OD 和 SD 方向引入的水平额外作用力, BD 方向主要表现为沉积方向的竖直额外作用力,其动态接触角的减小程度较小,因此在促进熔池润湿行为的表现不如后两者。对于熔池动态宽度,水平方向上的 UV-A LDED 引入了非稳定的水平外扩力,可导致动态接触角和固-液界面表面张力与基体平面的动态夹角减小,促进熔池扁平化扩展和熔池与基体动态边界平直化发展。OD 方向 UV-A 引入的非恒定作用力在熔宽方向上引入了非稳定的水平外扩力,而 SD 方向 UV-A 由于扫描方向前方激光移动和后端较冷固体区域限制,在流体熔宽方向上产生了挤压外扩作用。激光移动是引起 SD 方向 UV-A LDED 熔池内部流体紊乱流动的主要因素,但超声振动未对其方向上的过程不均匀性产生很显著的改善,因此其过程均匀性与对照组相近。

2.2 振动方向调控显微结构

超声振动方向对显微结构的影响如图 6 所示。由图 6a 可以看出,没有超声辅助的样品的微观结构呈现出大尺寸晶体和柱状晶,其生长方向与熔池凝固过程中的热流方向和沉积方向大致平行^[18,34]。由图 6b~d

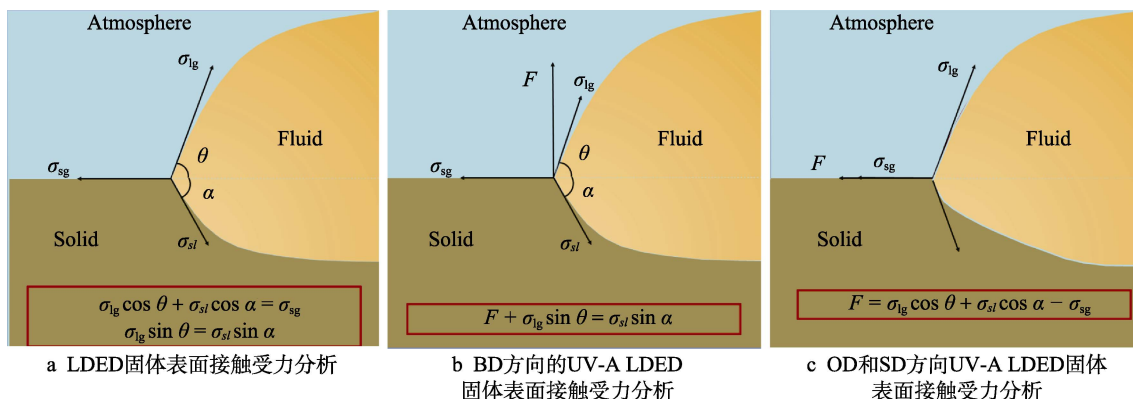


图 5 不同方向超声振动对熔池流动行为的影响^[32-33]

Fig.5 Influence of ultrasonic vibration in different directions on flow behavior of molten pools^[32-33].

a) contact force analysis of LDED solid surface; b) contact force analysis of UV-A LDED solid surface in BD direction; c) contact force analysis of UV-A LDED solid surface in OD and SD directions

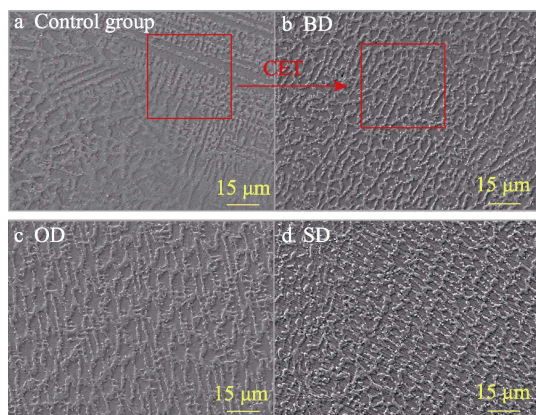


图 6 LDED 与不同方向 UV-A LDED IN718 合金显微组织形貌

Fig.6 Microstructure morphology of LDED and UV-A LDED IN718 alloys in different directions

可知,在 UV-A LDED 中,熔池微观结构发生显著变化,在不同方向的超声振动的影响下,微观结构呈均匀分布,长直柱状晶明显减少,转变为等轴形状,晶界分布也更为均匀。

为更好地定量分析 UV-A LDED 方向性对微观结构的影响,每组试验随机选取 2 个截面,每个截面随机选取 3 个区域,拍摄 1 000 倍 SEM,然后使用 Image-Pro-Plus 测量晶体的直径(最大费雷特直径)^[35],求取 6 次数据的平均值作为统计结果,如图 7 所示。随着超声振动方向的改变,晶体直径也实现不同程度的减小,BD 减小了 40.2%,OD 组减小了 42.8%,SD 组减小了 46.9%,微观结构趋于均匀化,晶界发生了不同程度的缩短,促进不同程度上的随机晶体组织的精细等轴晶体的形成,晶体密度也呈现不同程度上的显著提升。

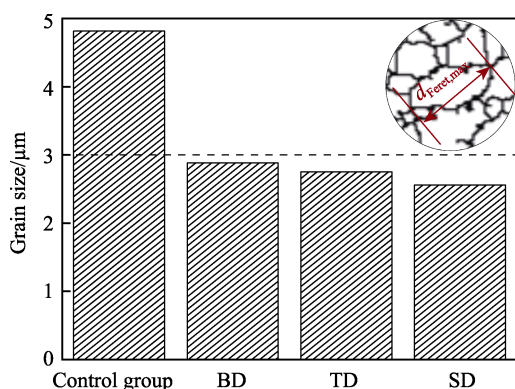


图 7 LDED 与不同方向 UV-A LDED IN718 合金晶粒尺寸(最大费雷特直径)

Fig.7 Crystal diameter measurements of LDED and UV-A LDED IN718 alloys in different directions (maximal Feret diameter)

不同方向的超声振动在 IN718 合金增材制造加工过程中凝固时,空化现象造成的局部激流和声流现象,对于枝晶破碎和晶体形核和生长在起着关键作用^[26]。本研究采用文献[25]中的计算方法判断空化现象是否

会发生。超声波强度用式(3)进行计算。

$$I = \frac{1}{2} \rho c (2\pi f A)^2 \quad (3)$$

式中: I 为超声波强度; ρ 为 IN718 合金液态密度,取 7.39 g/cm^3 ^[36]; c 为液体中的声速,在液态熔镍合金中,取 $4\,047 \text{ m/s}$ ^[37]。在振幅 $A=7.5 \mu\text{m}$ 和角频率 $f=25 \text{ kHz}$ 时,计算出的超声波强度为 $2.1 \times 10^7 \text{ W/m}^2$,远大于参考文献[16]中的空化阈值 (10^6 W/m^2)。超声波强度满足了超声振动在熔池中产生空化现象的条件,并且根据图 5 中显微组织的细化和晶体形状 CET 转变现象,可认为本研究中 IN718 合金熔池出现了较为明显的空化现象。

声强 I 随着声传播距离 z 的增加而降低^[38]。该距离与零件扁平化熔池的 BD、OD 和 SD 方向尺寸成正比,从而在 IN718 合金熔池中形成了相应方向的声压梯度。超声振动方向性对于 IN718 合金力学性能的影响主要在于超声强度方向性传播衰减和引起不同的温度梯度^[25-26]。温度不同梯度的降低使固相冷却过程中的成分过冷度呈现不同程度的增加^[39-40],晶体实现从不同程度的柱状到等轴转变 (Columnar to Equiaxed Transition, CET)。

2.3 振动方向细化 Laves 相

图 8a 显示了不同超声振动方向下 LDED 加工 IN718 零件的相组成比较,图 8b 对比了超声振动下 IN718 合金的白色沉淀相(即 Laves 相)的面积分数情况。分析图 8a 可以看出,LDED IN718 合金中,Laves 相在晶界树突间区域形成,未经超声辅助的样品存在大量 Laves 相,呈不规则和长条纹状。在 BD 方向的 UV-A 处理后,Laves 相由不规则的大块状转变为细小的点球状,且分布更为均匀。由于 CET 转化,存在柱状晶与等轴晶共存的情况,柱状晶的晶界处仍然存在小块不规则状 Laves 相,但数量较少,大部分 Laves 形貌发生了明显的点球状转变,面积分数下降了 60.4%。对于水平方向的超声振动组,即 OD 组和 SD 组,微观结构细化明显,长条状 Laves 相的面积分数下降,更多的晶间区存在的 Laves 相为尺寸较小的不规则状和点球状,整体面积分数分别下降了 30.4% 和 53.8%。在拉伸试验过程中,大尺寸的 Laves 相易成为裂纹源,将导致零件的延展性和强度下降^[36]。由此可知,经过 UV-A 处理的 LDED IN718 合金中,Laves 相实现了细化和减少,小颗粒状的 Laves 相在合金中占据主导地位。

2.4 振动方向改善力学性能

2.4.1 显微硬度

超声振动方向性对于单层多道 LDED IN718 合金零件显微硬度的影响如图 9 所示。

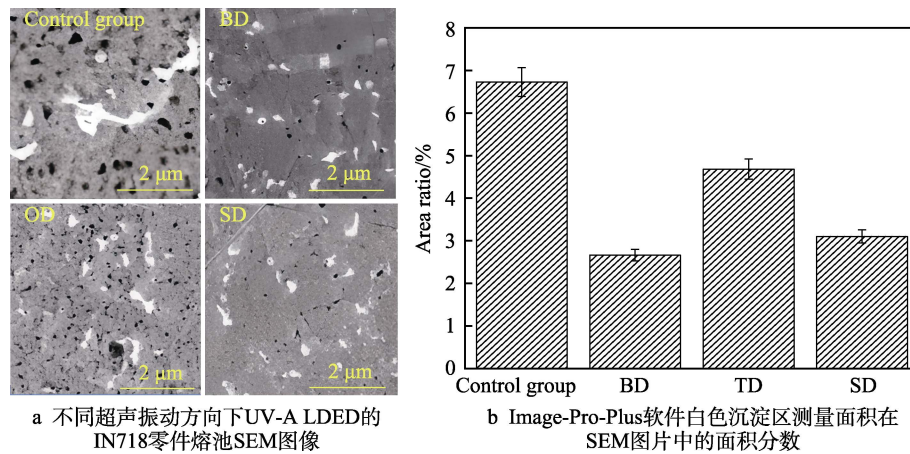


图 8 UV-A LDED 方向性对于 IN718 零件的相组成的影响

Fig.8 Effect of UV-A LDED directionality on phase composition of part IN718: a) SEM images of molten pool of part IN718 with UV-A LDED at different ultrasonic vibration directions; b) area fraction of white precipitation area measurement area in SEM images by Image-Pro-Plus software

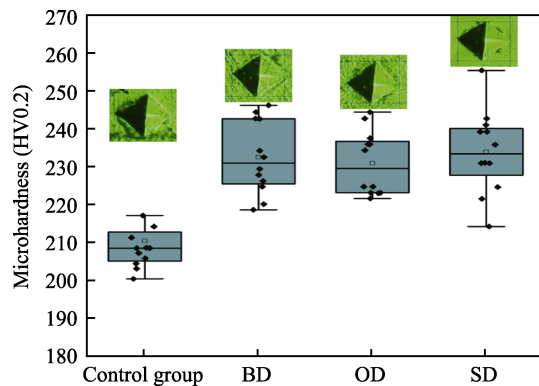


图 9 UV-A LDED 方向性对于 IN718 合金显微硬度的影响

Fig.9 Effect of UV-A LDED directionality on microhardness of alloy IN718

对于显微硬度, 根据经典 Hall-Petch 方程计算, 如式 (4) 所示^[29]。

$$H = H_0 + K_{HP} / \sqrt{d} \quad (4)$$

式中: H 为显微硬度值; d 为平均晶体直径; K_{HP} 为 Hall-Petch 系数, 与材料种类有关; H_0 为固有硬度值。

由上述经典 Hall-Petch 方程可得, 显微硬度值与晶粒尺寸的倒数根成正比关系。UV-A LDED 中, 由于超声振动的引入使 IN718 合金零件的显微硬度明显提高, 相较于对照组的显微硬度 (210.4HV0.2), BD 组、OD 组和 SD 组分别提高了 10.5%、9.7%、11.2%, 与文献[29]的研究结果相吻合。出现不同程度的显微硬度增加的主要原因是, 引入不同方向的超声波振动会不同程度上细化微观结构尺寸, SD 组晶体的平均直径减小最多, BD 和 OD 组相较于对照组微观结构尺寸的减小程度相近。因此, UV-A LDED 相较于未施加超声振动的对照组, 微观结构细化明显, 显微硬度增加, BD、OD 和 SD 方向箱线图的中位数和平均显微硬度与相应各组的晶体直径对比结果存

在较强的一致性。SD 组由于微观结构细化最明显, 平均显微硬度和显微硬度的中位数最高, BD、OD 组受晶体直径相差不大等因素的影响, 平均显微硬度差别不大。分析图 9 中的箱形图可以看出, 施加超声振动后, IN718 合金零件的显微硬度数据偏度增大, 但没有出现离群值。这表明超声振动方向性对 IN718 合金零件显微硬度的影响是整体性的, 而不是局部极端变化。已有研究者提出^[41-42], LDED 制造的 IN718 合金零件中, 在晶界树突间区域大量析出的 Laves 相使晶格产生畸变, 起到固溶强化的效果。此外, Laves 相本身为硬脆相, 因而可以有效提高涂层的显微硬度。超声振动辅助的 LDED IN718 合金零件, 由于在超声的空化作用下, 熔池内部产生局部的高温高压, 可使溶质原子的扩散和分布更为均匀, 进而有效抑制溶质偏析, Laves 点球化转变和分布更为均匀, 减少了局部大尺寸的 Laves 相。施加超声振动后, 由于元素固溶偏析和由大尺寸脆硬相引起局部硬度激增的情况减少, 显微硬度更倾向于表现为整体的变化, 没有硬度很高的离群值。超声振动后, 显微硬度的增加, 是微观结构细化、元素固溶偏析和脆硬相消减程度综合影响的结果, 显微硬度的均值变化趋势和晶体直径变化趋势呈现更强的相关性。其中, SD 方向上的超声振动由于晶体组织细化和硬质相颗粒点球化转变综合能力较好, 从而显微硬度提高效果最好。

2.4.2 拉伸性能

对照组和 3 种超声振动辅助处理态 LDED IN718 合金的室温拉伸性能如图 10 所示。可以看出, 在 3 种 UV-A LDED 试验组中, OD 组具有最高的强度 (抗拉强度为 871.1 MPa), 延展性最低 (伸长率为 44.5%); SD 组具有最高的强度 (抗拉强度为 887.6 MPa), 伸长率为 48.2%, 可见强度的提升方向与超声振动方向存在一定的相关性。另外, 在水平方向 (特别是 SD 组) 展现出了较好的强度和塑性的匹配。比较 OD 和

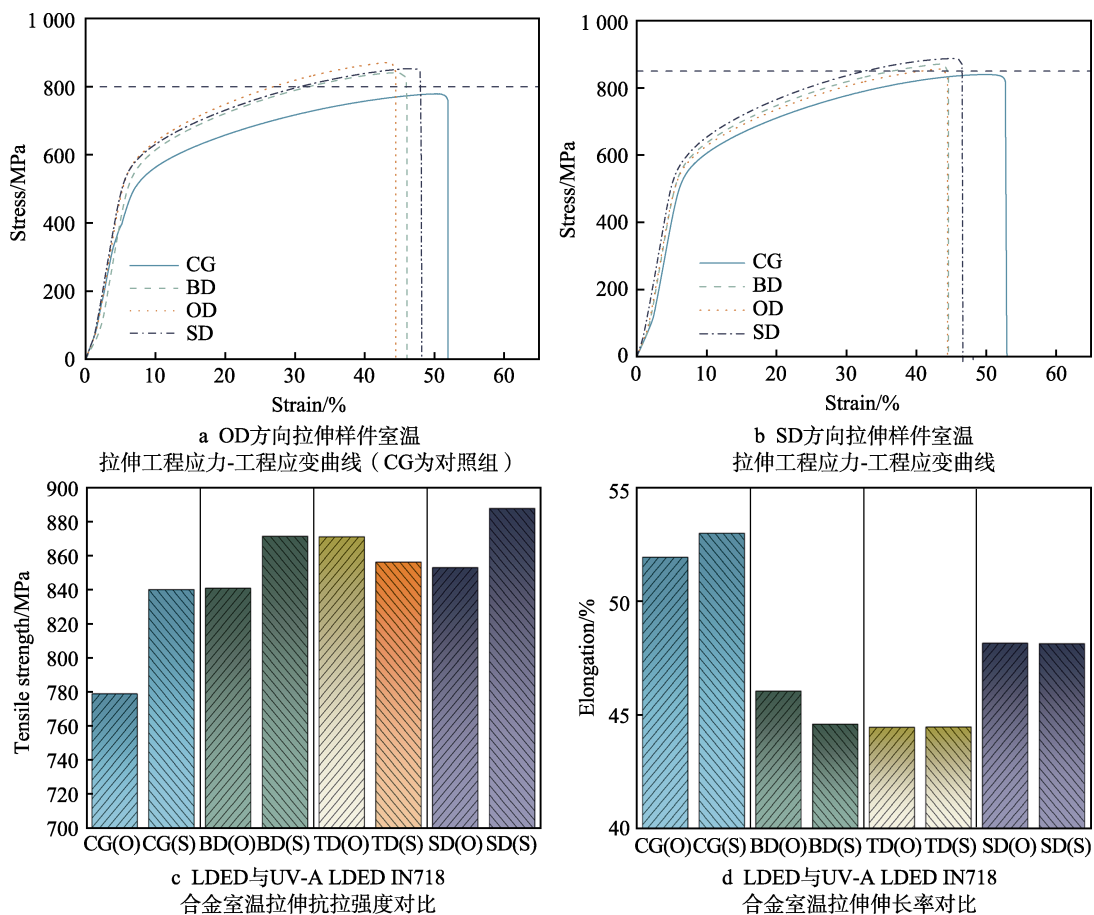


图 10 UV-A LDED 方向性对 IN718 零件室温拉伸性能的影响

Fig.10 Effect of UV-A LDED directionality on room temperature tensile properties of IN718 parts: a) room temperature tensile engineering stress-engineering strain curves of tensile samples in OD direction (CG is the control group); b) room temperature tensile engineering stress-engineering strain curves of tensile samples in SD direction; c) comparison of room temperature tensile strengths of LDED vs. UV-A LDED IN718 alloys; d) comparison of room temperature tensile elongation of LDED and UV-A LDED IN718 alloy

SD 方向拉伸组抗拉强度、屈服强度和延展性的差值可以得出,施加超声振动后,IN718 在水平方向的力学性能差异减小,一定程度上反映了超声振动可减缓 IN718 合金力学性能的各向异性,OD 方向的超声振动在此方面表现最为突出。

对于室温拉伸性能,对比图 8~10 可以看出,单纯的激光定向能沉积由于激光工艺参数匹配不良,造成 IN718 零件的显微组织存在大尺寸的柱状晶体和晶间长条状 Laves 相尺寸,是诱发沉积试样在拉伸过程中发生断裂的主要原因。施加超声振动后,长条状的 Laves 相发生了点球状转变。在拉伸过程中,大尺寸长条状的脆硬相比细小颗粒状的脆硬相更易发生破碎,均匀弥散的细小 Laves 相可以起到更好的固溶强化作用。不同方向的超声振动引入 Laves 相点球化引起的固溶强化,以及微观结构细化引起的细晶强化,综合提升了 IN718 合金零件的拉伸性能。不同方向的超声振动辅助协同作用激光定向能沉积,使 IN718 合金形成了更为致密的微观结构,使抗拉强度和屈服强度呈现不同程度的增加。由于 BD 组和 SD 组(特别是 SD 组)的 UV-A LDED 细晶强化和 Laves

相脆硬相细小颗粒状转变的综合贡献度程度较优,相较于未施加超声振动的 LDED 对照组,一定程度上减少延展性的牺牲量,在水平方向的力学性能差异实现了不同程度的减小。金属增材制造存在的一个很大问题是常见的力学性能各向异性,这与大多数商业合金中沿构建方向生长的粗柱状晶粒密切相关^[43]。分析其原因是,施加了超声振动后,熔池形态相对均匀化,晶粒形态也发生了较为显著的不同程度的 CET 转变,Laves 相也发生不同程度上的点棒状转变,促进了 IN718 合金力学性能的各向同性发展。

3 结论

本文研究了超声振动方向对于激光定向能沉积制造 IN718 零件的影响(包括 BD 方向、OD 方向和 SD 方向)。通过熔池原位监测分析揭示了 UV-A LDED 方向性对熔池流动行为的影响,同时研究了超声振动方向性对于成形零件的微观结构特征和力学性能的影响。主要结论如下:

1) 不同方向超声振动的引入促进了熔池中液态

金属向四周进行不同程度的润湿面积扩展, BD 组、OD 组、SD 组熔池面积分别增大了 84.0%、86.4%、79.6%, 并且形状更为规则, 拖尾现象得到改善, 超声振动方向对于熔池流动行为的影响与不同方向高频振动引入的额外作用力的大小和稳定程度有关。

2) UV-A LDED 方向性对于微观结构和晶体直径产生了不同的改善和细化。微观结构细化能力从小到大为 BD 组、OD 组、SD 组, 水平方向的晶体等轴晶转变能力优于 BD 方向。由于超声强度方向性传播衰减和引起不同的声压梯度, 导致了方向性的声流效应和机械振动搅拌作用等, 从而获得了方向性的细晶强化贡献度、柱状晶到等轴晶转变。

3) 超声振动促进了 IN718 合金 Laves 相的细化和面积分数的减小。随着方向性声强衰减, BD 组相较于 OD 组和 SD 组, Laves 相的细小点球状改变和面积分数减小能力较强, 且分布更为均匀。Laves 相主要在晶界树突间区域形成, Laves 相的点球化转变和减小与不同程度上的细小等轴晶粒的随机晶体组织相关。

4) 不同方向的超声振动辅助 LDED IN718 零件获得了较好的硬度、强度和塑性匹配。相较于对照组 (210.4HV0.2), BD 组、OD 组和 SD 组的显微硬度分别提高到了 232.5HV0.2、230.9HV0.2 和 233.9HV0.2, 变化趋势与晶体直径变化趋势一致。材料的抗拉强度和屈服强度在不同程度获得增强, 水平方向 (特别是 SD 组) 在提高材料强度的同时, 还在一定程度上保持了材料的延展性。另外, 超声振动的应用减少了 IN718 合金在不同方向上的力学性能差异。

参考文献:

- [1] LI F, LI Z, WANG L, et al. Review on ICE Remanufacture with Additive Repair Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(9): 1119-1127.
- [2] LI F, QI X, LI Y, et al. Review on Repair Technologies for Key Part Remanufacturing of Shield Machines[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(7): 820-831.
- [3] LIU Y H, WANG Z Y, GAO B, et al. Evaluation of Mechanical Properties and Porcelain Bonded Strength of Nickel-Chromium Dental Alloy Fabricated by Laser Rapid Forming[J]. Lasers in Medical Science, 2010, 25(6): 799-804.
- [4] AHMAD SIDDIQUI A, DUBEY A K. Recent Trends in Laser Cladding and Surface Alloying[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106619.
- [5] 姚建华, 李传康. 激光表面强化和再制造技术的研究与应用进展[J]. 电焊机, 2012, 42(5): 15-19.
YAO J H, LI C K. Research and Application of Laser Surface Strengthening and Remanufacturing Technology[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(5): 15-19.
- [6] LALEGANI DEZAKI M, SERJOUEI A, ZOLFAGHARIAN A, et al. A Review on Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Directed Energy Deposition (DED) Process[J]. Advanced Powder Materials, 2022, 1(4): 100054.
- [7] ZHAO C M, LIAN G F, ZHANG Y, et al. The Forming Control Method of Double-Layer and Multi-Track Stacking Laser Cladding Applied on Crankshafts Restoration[J]. JOM, 2021, 73(12): 4289-4298.
- [8] 梁万旭, 杨勇, 金康, 等. 基于响应面法的同轴送粉多道激光熔覆层形貌预测[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 0114012.
LIANG W X, YANG Y, JIN K, et al. Morphology Prediction of Coaxial Powder Feeding Multichannel Laser Cladding Layer Based on Response Surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0114012.
- [9] LI C, SUN R W, LI Y L, et al. Wear Mechanism of a Laser Cladded Fe-Based Self-Lubricating Composite Coating for Protecting Counter-Abrasive Parts[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 459: 129402.
- [10] QI X X, LI F Y, LI Y L, et al. Microstructure Regulation and Reinforcement Mechanisms of Ultrafine TiC/Fe55 Composite Coatings via Laser Melting Deposition[J]. Materials & Design, 2023, 229: 111924.
- [11] TELASANG G, DUTTA MAJUMDAR J, WASEKAR N, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Clad and Post-Cladding Tempered AISI H13 Tool Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(5): 2309-2321.
- [12] VILAR R. Laser Cladding[J]. Journal of Laser Applications, 1999, 11(2): 64-79.
- [13] ZHU S, DU W B, WANG X M, et al. Advanced Additive Remanufacturing Technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2023, 2(1): 100066.
- [14] MOHSAN A U H, ZHANG M N, WANG D F, et al. State-of-the-Art Review on the Ultrasonic Vibration Assisted Laser Cladding (UVALC)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 107: 422-446.
- [15] TAN C L, LI R S, SU J L, et al. Review on Field Assisted Metal Additive Manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 189: 104032.
- [16] ESKIN G I, ESKIN D G. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [17] HUTCHISON T S. Ultrasonic Absorption in Solids[J]. Science, 1960, 132(3428): 643-652.
- [18] LIU F C, LIN X, LENG H, et al. Microstructural Changes in a Laser Solid Forming Inconel 718 Superalloy Thin Wall in the Deposition Direction[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 330-335.
- [19] 姚喆赫, 沈奇艳, 葛宏江, 等. 超声对激光熔覆成形中熔池润湿行为的影响研究[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 20-29.
YAO Z H, SHEN Q Y, GE H J, et al. Influence of Ultrasound on the Wetting Behavior of Molten Pool in Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2022, 51(10): 20-29.

- [20] 俞晓文, 姚喆赫, 张操棋, 等. 多维高频振动对激光熔覆成形几何形貌的影响研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 286-293.
YU X W, YAO Z H, ZHANG C Q, et al. Effects of Multi-Dimensional High Frequency Vibration on Geometrical Morphology of Laser Cladding Forming[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 286-293.
- [21] 陈健, 姚喆赫, 姚建华, 等. 超声振动辅助激光熔覆技术研究进展综述[J]. 航空制造技术, 2021, 64(12): 36-46.
CHEN J, YAO Z H, YAO J H, et al. State-of-Art Review on Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Cladding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(12): 36-46.
- [22] CONG W L, NING F D. A Fundamental Investigation on Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Engineered Net Shaping of Stainless Steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 121: 61-69.
- [23] NING F D, CONG W L. Microstructures and Mechanical Properties of Fe-Cr Stainless Steel Parts Fabricated by Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Engineered Net Shaping Process[J]. Materials Letters, 2016, 179: 61-64.
- [24] NING F D, HU Y B, LIU Z C, et al. Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Engineered Net Shaping of Inconel 718 Parts: Microstructural and Mechanical Characterization[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(6): 061012.
- [25] TODARO C J, EASTON M A, QIU D, et al. Grain Refinement of Stainless Steel in Ultrasound-Assisted Additive Manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101632.
- [26] WANG H, HU Y B, NING F D, et al. Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Engineered Net Shaping of Inconel 718 Parts: Effects of Ultrasonic Frequency on Microstructural and Mechanical Properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 276: 116395.
- [27] NING F, JIANG D, LIU Z, et al. Ultrasonic Frequency Effects on the Melt Pool Formation, Porosity, and Thermal-Dependent Property of Inconel 718 Fabricated by Ultrasonic Vibration-Assisted Directed Energy Deposition[J]. J Manuf Sci Eng Trans ASME, 2021, 143(5): 051009.
- [28] ZHU L D, YANG Z C, XIN B, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Parts Formed by Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Cladding of Inconel 718[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 410: 126964.
- [29] TODARO C J, EASTON M A, QIU D, et al. Grain Structure Control during Metal 3D Printing by High-Intensity Ultrasound[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 142.
- [30] 于新善, 孟祥印, 金腾飞, 等. 基于改进 Canny 算法的物体边缘检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(22): 3788/LOP223400.
YU X S, MENG X Y, JIN T F, et al. Object Edge Detection Algorithm Based on Improved Canny Algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(22): 3788/LOP223400.
- [31] REN C Q. Multi-Linear Dimension of Inscribed Polygons [C]// Proceedings of CSAMCS 2021. Nanjing: SPIE, 2022.
- [32] 刘洪国, 孙德军, 郝京诚. 新编胶体与界面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
LIU H G, SUN D J, HAO J C. Colloid and Interface Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press 2016.
- [33] 俞伟元, 邢春晓, 林巧力. 超声波振动对水/E-GaIn 在不同基板表面润湿的影响[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(5): 1186-1191.
YU W Y, XING C X, LIN Q L. Effect of Ultrasonic Vibration on Wetting of Water/E-GaIn on Different Substrate Surfaces[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(5): 1186-1191.
- [34] LIU F C, LIN X, HUANG C P, et al. The Effect of Laser Scanning Path on Microstructures and Mechanical Properties of Laser Solid Formed Nickel-Base Superalloy Inconel 718[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(13): 4505-4509.
- [35] WALTON W H. Feret's Statistical Diameter as a Measure of Particle Size[J]. Nature, 1948, 162: 329-330.
- [36] WANG H P, ZHENG C H, ZOU P F, et al. Density Determination and Simulation of Inconel 718 Alloy at Normal and Metastable Liquid States[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(3): 436-439.
- [37] BLAIRS S. Correlation between Surface Tension, Density, and Sound Velocity of Liquid Metals[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 302(1): 312-314.
- [38] KOMAROV S V, KUWABARA M, ABRAMOV O V. High Power Ultrasonics in Pyrometallurgy: Current Status and Recent Development[J]. ISIJ International, 2005, 45(12): 1765-1782.
- [39] DEBROY T, MUKHERJEE T, MILEWSKI J O, et al. Scientific, Technological and Economic Issues in Metal Printing and Their Solutions[J]. Nature Materials, 2019, 18(10): 1026-1032.
- [40] PUGA H, COSTA S, BARBOSA J, et al. Influence of Ultrasonic Melt Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi₉Cu₃ Alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1729-1735.
- [41] SUI S, TAN H, CHEN J, et al. The influence of Laves phases on the room temperature tensile properties of Inconel 718 fabricated by powder feeding laser additive manufacturing [J]. Acta Mater, 2019, 164: 413-27.
- [42] SUN S, FU H, PING X, et al. Formation mechanism and mechanical properties of titanium-doped NbC reinforced Ni-based composite coatings [J]. Appl Surf Sci, 2019, 476: 914-27.
- [43] CHEN Z J, CHEN Y, ZHANG Q, et al. Study on the Tensile and Wear Properties of Laser-Cladded IN718 Superalloy Reinforced by Carbon Nanoparticles Transformed from Carbon Nanotubes[J]. Journal of Materials Research, 2020, 35(20): 2643-2651.