

• 前沿进展 Research Progress •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5273

激光熔化沉积 304 不锈钢组织及性能研究进展

崔玮铭¹, 曾禹周¹, 白启恒¹, 王陈昕炜¹, 李旭¹, 潘成博¹, 王建东¹, 赵宇凡²

(1. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001 2. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室 陕西 西安 710072)

摘要:近年来激光熔化沉积增材制造技术因具有成形自由度、加工效率及材料利用率高等特点,是金属材料近净成形理想的制造方法。304 不锈钢具有良好的耐蚀性、耐热性、低温强度和机械性能,广泛应用于石油、核能、化工、航天等工业领域。一些形状复杂、需要一体成型的 304 不锈钢零件难以用传统制造方法生产,而激光熔化沉积技术为其提供了新的途径。本文在分析大量文献的基础上,评述了国内外激光熔化沉积 304 不锈钢的主要研究进展,分析了激光熔化沉积 304 不锈钢的微观组织特征和力学性能特点,研究了超声能场对激光熔化沉积 304 不锈钢组织与性能的改善作用,最后指出现阶段激光熔化沉积 304 不锈钢研究工作的不足,并在创新工艺技术和完善研究内容等方面提出了展望。

关键词:激光熔化沉积;304 不锈钢;组织;性能;超声能场

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)07-0705-14

Research Progress on Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel Manufactured by Laser Melting Deposition

CUI Weiming¹, ZENG Yuzhou¹, BAI Qiheng¹, WANG Chenxinwei¹, LI Xu¹,
PAN Chengbo¹, WANG Jiandong¹, ZHAO Yufan²

(1. College of Material Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In recent years, laser melting deposition (LMD) additive manufacturing technology has emerged as an ideal near-net-shaped forming method for metallic materials because of its high shaping flexibility, high processing efficiency, and excellent material utilization rate. 304 stainless steel, renowned for its superior corrosion resistance, heat resistance, low-temperature strength, and mechanical properties, is widely applied across various industrial sectors, such as petroleum, nuclear energy, chemical engineering, and aerospace. For geometrically complex 304 stainless steel components requiring monolithic fabrication, traditional manufacturing methods often face significant challenges, whereas laser melting deposition technology provides a novel solution. On the basis of an extensive review of the literature, this paper summarizes major research advancements in LMD of 304 stainless steel both domestically and internationally. The microstructural characteristics and mechanical properties of LMD-fabricated 304 stainless steel are analysed first. The improvement effects of the ultrasonic field on the microstructure and performance of LMD-processed 304 stainless steel are subsequently investigated. Finally, the current limitations in LMD research on 304 stainless steel are discussed, with perspectives proposed for developing innovative process technologies and advancing comprehensive experimental studies.

Key words: laser melting deposition; 304 stainless steel; microstructure; properties; ultrasonic field

激光熔化沉积(laser melting deposition, LMD)技术作为一种先进的增材制造(additive manufacturing,

AM)工艺,通过高能激光束逐层熔化金属粉末并沉积成型,可实现复杂几何结构金属零件的快速制造^[1]。

收稿日期: 2025-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(52575365);凝固技术全国重点实验室开放课题(SKLS202505);中央高校基本科研业务费

作者简介: 崔玮铭,2002 年生,硕士生。研究方向为激光增材制造。Email: cwm@hrbeu.edu.cn

通信作者: 王建东,1987 年生,博士,副教授。研究方向为激光增材制造。Email: wangjiandong@hrbeu.edu.cn

引用格式: 崔玮铭,曾禹周,白启恒,王陈昕炜,李旭,潘成博,王建东,赵宇凡. 激光熔化沉积 304 不锈钢组织及性能研究进展[J]. 铸造技术, 2026, 47(7): 705-718.

CUI W M, ZENG Y Z, BAI Q H, WANG C X W, LI X, PAN C B, WANG J D, ZHAO Y F. Research progress on microstructure and properties of 304 stainless steel manufactured by laser melting deposition[J]. Foundry Technology, 2026, 47(7): 705-718.

与传统铸造、锻造等方法相比,LMD 技术具有显著优势:①能够实现材料的精确堆积,最大限度减少原材料浪费^[2];②大幅缩短产品开发周期,并支持复杂结构的直接制造,无需传统制造所需的模具和辅助结构^[3-4]。在航空航天领域,LMD 技术已成功应用于发动机叶片、涡轮盘等关键部件的制造^[5-6];在汽车制造领域,用于高性能零部件的快速原型和小批量生产^[7]。

304 不锈钢(AISI 304)作为奥氏体不锈钢的典型代表,因其优异的耐腐蚀性(在大气、淡水、稀酸等环境中表现出色)、良好的机械性能、可加工性和焊接性能,广泛应用于海洋和航空航天等领域^[8-9]。然而,LMD 工艺特有的快速热循环和非平衡凝固条件,导致 304 不锈钢在成形过程中形成独特的微观组织特征,包括亚微米尺度的柱状晶、细小的等轴晶、细胞亚结构及可能的马氏体相变区域。这些非平衡组织不仅造成明显的各向异性,还引发显著的残余应力,严重制约了零件的力学性能和使用寿命^[10]。

针对上述挑战,研究者们提出了多种优化策略,通过精确调控激光功率、扫描速度、送粉速率等关键工艺参数,可以有效控制熔池形态和凝固过程^[11];引入超声能场、热处理等后处理技术可显著改善微观组织均匀性,降低残余应力并提升力学性能^[12];而数值模拟技术的发展,为预测 LMD 过程中的组织演变、应力分布和力学性能提供了强大的理论工具^[13]。

基于此,本文系统综述 304 不锈钢激光熔化沉积技术的最新研究进展,深入探讨 LMD 工艺参数对组织演变的影响规律、缺陷的形成机制、后处理技术对性能的优化效果,以及数值模拟在工艺优化和残余应力预测中的关键作用。通过整合多学科研究成果,为后续研究提供参考。

1 LMD 制造 304 不锈钢微观结构

LMD 制造过程中,金属在激光作用下经历快速加热和快速冷却过程,不同条件下显微组织可能出现差异,甚至缺陷,对工件的力学性能产生较大影响。本部分总结了 LMD 制备 304 不锈钢微观组织结构的研究成果。

1.1 LMD 制造 304 不锈钢微观组织

LMD 技术通过高能激光束实现金属粉末的快速熔化与凝固,其特有的快速冷却特性使凝固后的晶粒尺寸显著小于传统锻造工艺(通常可减小 50%以上)。在 LMD 制造过程中,热过冷(thermal undercooling)和成分过冷(compositional undercooling)现

象对合金的凝固结晶形态产生关键影响。具体而言,固液界面前沿液相中温度梯度的大小直接决定了晶体的生长方式,一般情况下称温度梯度为 G ,凝固速度为 R 。在 LMD 工艺中, $(G \times R)$ 和 G/R 是影响快速凝固微观结构的关键因素,其中 $G \times R$ 决定凝固结构的尺寸, G/R 决定晶体生长形态^[14]。当 G/R 的值较大时,晶体以平面晶方式稳定生长;较小时,则易形成胞状晶结构;而当 G/R 的值进一步降低时,晶体则倾向于发展为树枝晶形态(图 1)^[15-16]。这种温度梯度驱动的生长机制是 LMD 工艺中微观组织非平衡演化的核心物理基础^[17]。

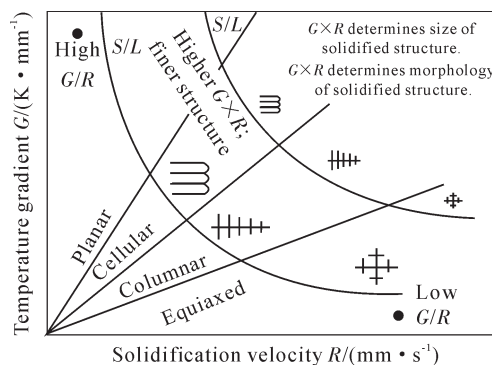


图 1 G 和 R 对凝固结构形貌和尺度的影响^[15]

Fig.1 Effects of G and R on the morphology and scale of the solidified structure^[15]

一般在熔池顶部, G/R 较低, $G \times R$ 较高,熔池形貌为等轴枝晶,晶粒尺寸较细。在熔池底部, G/R 较高,形貌为平面晶^[18]。在熔池中心,观察到中等的 G/R ,形貌为柱状枝晶。肖鱼等^[19]使用激光熔化沉积制备 304 不锈钢薄壁结构件,发现在离基体不同距离的位置上晶体显微组织存在差异。基体与堆积层之间有一条扩散形成的熔合带,熔合带上方一段距离内呈现平面晶生长方式,这是因为基板初始温度相对熔池温度很低,固液界面温度梯度大,不会形成成分过冷区。离基体较近的堆积层中呈现外延生长的树枝晶组织,且下部枝晶较上部更粗大(图 2a 和 b)。这是由于随着堆积层数增加,热累积导致温度梯度减小,出现较宽的成分过冷区,出现树枝晶,而下部堆积层经历更多的热累积,使得晶粒长大变粗^[20]。堆积层顶部的晶体呈现较短的树枝晶和细小的等轴晶组织特征(图 2c 和 d),其原因是顶部堆积层向空气中散热,使得该位置温度梯度较小,形成了近似等轴晶的组织。

Chai 等^[21]研究了扫描速度对 304 不锈钢激光增材制造中晶粒和微观结构形貌的影响,结果如图 3 所示。在扫描速度初始阶段增加时,B 区域的 Fe/Cr 元素比先升高后降低。当扫描速度为 7 mm/s 时,

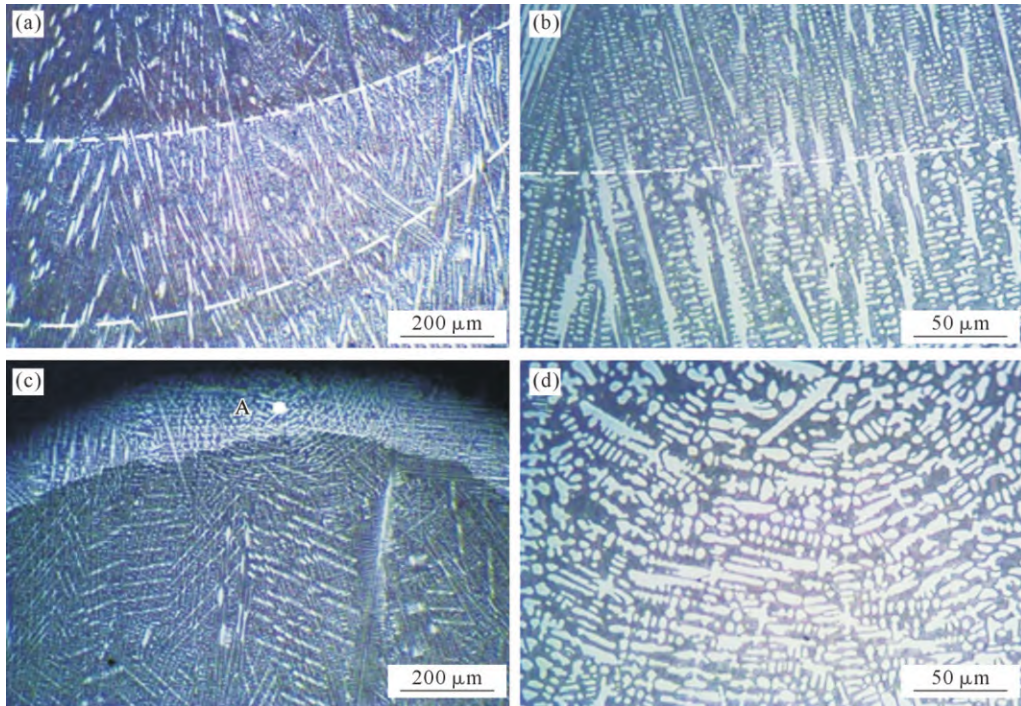


图 2 304 不锈钢薄壁结构显微组织:(a) 底部-低倍;(b) 底部-高倍;(c) 顶部-低倍;(d) 顶部-高倍^[14, 19]

Fig.2 Microstructure of a 304 stainless steel thin-walled structure: (a) bottom-low magnification; (b) bottom-high magnification; (c) top-low magnification; (d) top-high magnification^[14, 19]

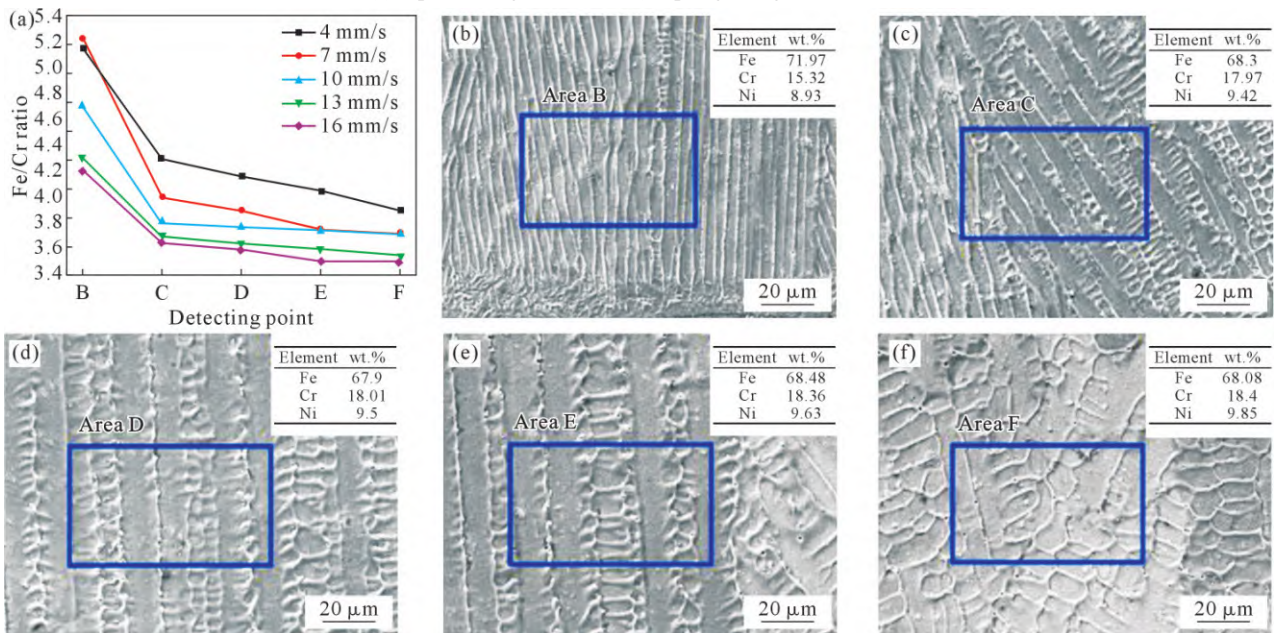


图 3 扫描速度及取样位置对熔覆层元素分布与形貌的影响:(a) 不同扫描速度下各取样点的 Fe/Cr 元素比;(b~f) 10 mm/s 扫描速度下沿高度方向(间隔 1 mm)由底部至顶部的微观形貌及能谱分析^[21]

Fig.3 Effect of the scanning speed and sampling position on the element distribution and morphology of the cladding layer: (a) Fe/Cr element ratio at different sampling points under various scanning speeds; (b~f) microstructure and EDS analysis results along the height direction (1 mm interval) from bottom to top at a scanning speed of 10 mm/s^[21]

Fe/Cr 元素比达到最大值 5.22。在低扫描速度下,激光能量输入时间充足,使熔池元素分布趋于均匀,Fe/Cr 元素比持续增加。当扫描速度超过 7 mm/s 时,单位长度扫描时间减少。尽管激光搅拌仍保持均匀,但能量输入的降低导致材料混合不充分,Fe/Cr 混合比逐渐下降。对于距离基板较远的 C~F 区域,元素稀释效应逐渐减弱。在固定扫描速度条件下,

所有采样区域的 Fe/Cr 元素比均随距基板距离的增加而逐渐降低。B 区域位于稀释区(DZ),元素混合现象显著,因此 Fe/Cr 元素比相对较大。当距离从基板逐渐增加至熔覆层顶端(E 区域)时,元素在熔覆层与基板间的活性迁移逐渐消失,Fe/Cr 元素比在达到稳定值后不再发生明显变化。

虽然奥氏体不锈钢被设计为常温下的全奥氏体

相(γ 相),但是由于加工时的冷却速度不同,奥氏体不锈钢会以不同的模式完成凝固过程,在凝固试样中可能包含残余的高温铁素体(δ 相)^[22-23]。Huang等^[24]通过EBSD分析了LMD制备SS304样品 XOY 与 XOZ 两个平面上的相组成,EBSD谱如图4所示。红色部分代表体心立方(BCC)结构的铁素体,背景为面心立方(FCC)结构的奥氏体。如图4a所示, XOY 平面上没有明显的铁素体聚集体;图4b和c是 XOZ 平面上任意两个位置的EBSD谱。由图4b和c可知, XOZ 平面上存在铁素体,大多数铁素体倾向沿奥氏体晶界析出^[25]。在多个位置测量铁素体含量后, XOZ 平面上的铁素体含量约为10%。

综上,现有研究已基本阐明了LMD工艺中凝固参数与304不锈钢微观组织形态的映射关系,明确了从平面晶、胞状晶到树枝晶的演变规律,并揭示了快速凝固导致的元素偏析与亚稳相的形成机制。这些研究解释了LMD成形件组织呈现高度非均匀性的物理本质,即熔池不同区域的热历史差异直接决定了局部微观结构的差异。

1.2 缺陷产生机理

在LMD制造304不锈钢零件的过程中,不合适的工艺参数可能会导致堆积层出现粘粉、成形不饱满、烧蚀、氧化、鱼鳞纹、堆积层与基体未熔合或结合不良、气孔、裂纹等缺陷^[26-31]。粘粉会影响堆积层表面粗糙度,降低成形质量,多层堆积时更会影响层间结合,降低零件性能^[32]。粘粉现象通常是由于部分金属粉末未完全熔化导致的,激光功率过低,扫

描速度过快或送粉速率过高时,热输入不足以完全熔化进入熔池的全部粉末,未熔化的细小粉末颗粒会粘附于堆积层表面,形成粘粉缺陷^[33]。其中,扫描速度过快会导致单位长度内进入熔池的粉末量减少,造成堆积层成形不饱满,同时影响层间冶金结合质量^[34]。

烧蚀与氧化缺陷通常与熔池温度过高或熔池处于液态时间过长有关^[35]。激光功率过高或扫描速度过低时,熔池热输入过大,热渗透超出材料预期,导致晶粒边界模糊,材料微观组织劣化。如图5a和c所示^[36],过大的热输入导致304不锈钢激光熔化沉积试样组织出现烧蚀现象,致使晶粒边界不明显。与之对应,图5b和d中由于热输入相对较低,可以观察到清晰的晶界。另外,过高的温度梯度还会引发熔池内部剧烈对流,在马兰戈尼效应驱动下,熔池后缘凸起,形成不规则的鱼鳞纹结构,这种波纹状特征进一步影响零件的机械性能。

气孔、裂纹等缺陷不仅出现在零件表面,还通常出现在零件内部,潜在危害性较大,但在激光沉积过程中难以完全避免^[37]。Arrizubieta等^[38]通过数值模拟评估304不锈钢中孔隙形成的概率,模拟结果显示,在单墙体的下部区域发现存在气孔缺陷。其成因可能包含两方面:①材料熔化时间不足,导致被困气体未能及时逸出熔池;②材料凝固时产生缩孔。上部区域也检测到气孔缺陷,其成因可明确归结为熔化时间不足(图6)。这一结论通过沉积层内部发现的未熔合粉末颗粒得到验证,即由于熔融材料快速凝固,粉

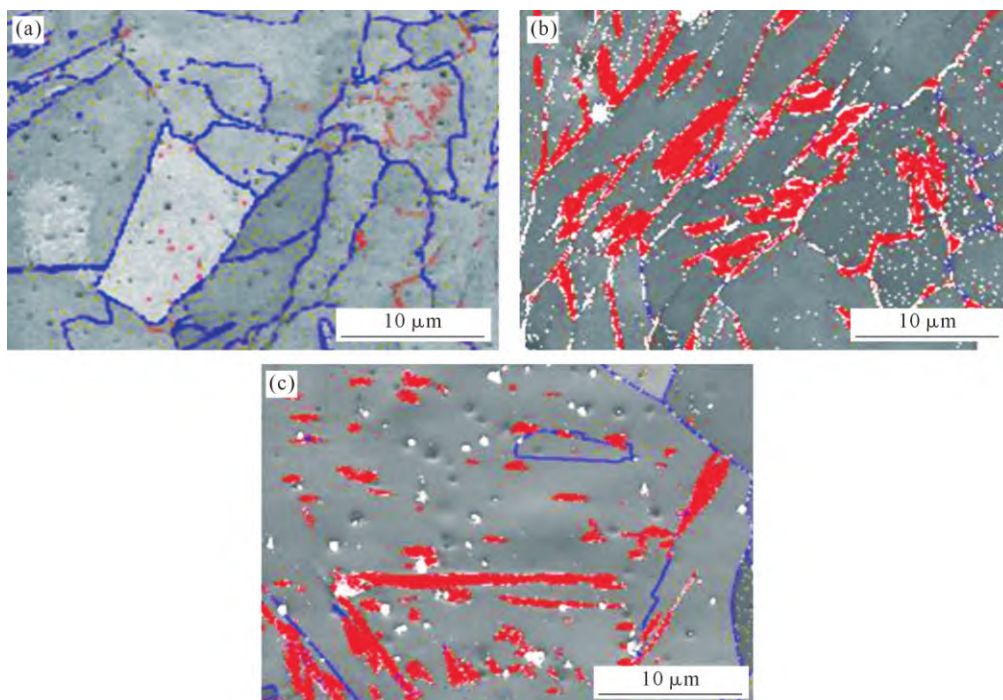


图4 SS304样品EBSD图:(a) XOY 面;(b, c) XOZ 面^[24]

Fig.4 EBSD maps: (a) XOY plane; (b, c) XOZ plane^[24]

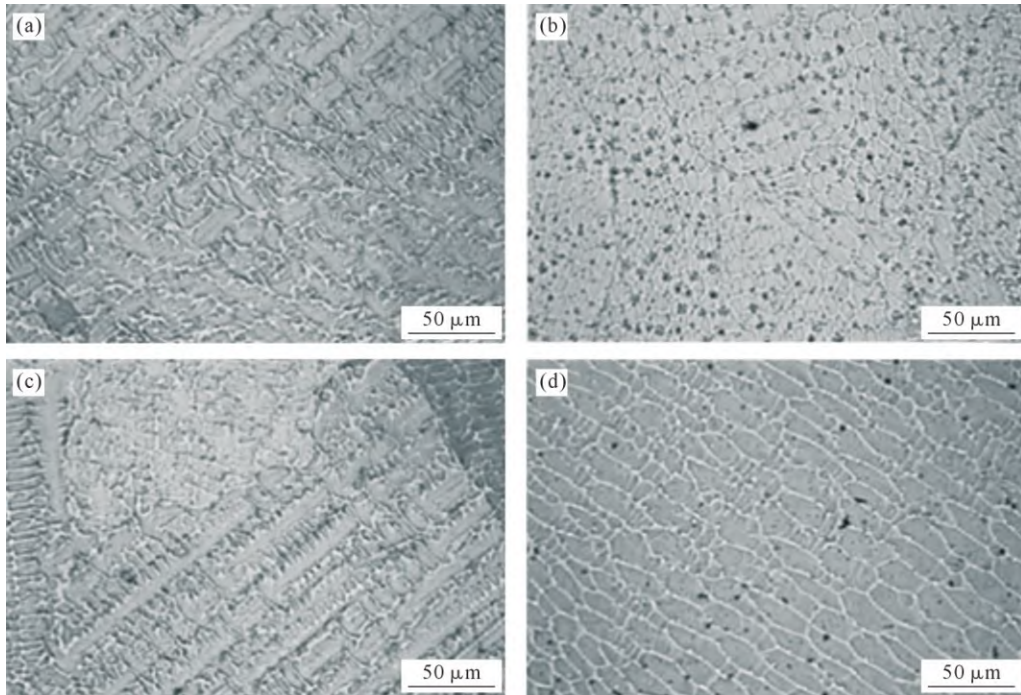


图 5 不同激光功率和扫描速度下激光熔化沉积 304 不锈钢组织:(a) 2 700 W, 13 mm/s; (b) 2 500 W, 13 mm/s; (c) 2 500 W, 7 mm/s; (d) 2 500 W, 16 mm/s^[36]

Fig.5 Microstructure of LMD 304 stainless steel under different laser powers and scanning speeds: (a) 2 700 W, 13 mm/s; (b) 2 500 W, 13 mm/s; (c) 2 500 W, 7 mm/s; (d) 2 500 W, 16 mm/s^[36]

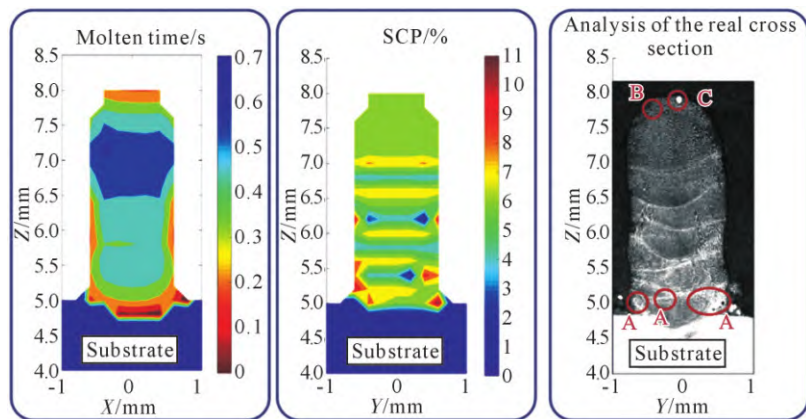


图 6 根据熔化时间(左)和缩孔概率(中)预测孔隙,对检测到的孔隙明显的真实横截面(右)进行分析^[38]

Fig.6 Pore apparition prediction according to the molten time (left) and the shrinking cavity probability (center), and the analysis of the real cross section (right) where the detected pores are highlighted^[38]

未颗粒未能完全熔化,由此证明邻近区域气孔的产生确实源于熔化时间不足。

现有工作通过实验与模拟相结合的方式,深入解析了 LMD 成形 304 不锈钢中粘粉、氧化、气孔及未熔合等典型缺陷的形成机理,并建立了工艺参数与缺陷类型之间的联系。这些研究解决了实际加工中“参数选择盲目”的问题,明确了抑制表面与内部缺陷的能量输入阈值。但值得注意的是,气孔和微裂纹等内部缺陷往往受多物理场耦合影响,单纯依靠工艺参数优化难以完全消除,特别是在复杂热循环条件下的缺陷动态演变机制仍需进一步量化研究。

2 LMD 制造 304 不锈钢力学性能

微观组织决定宏观性能,LMD 工艺特有的非平衡凝固组织必然映射在材料的力学行为中。如前所述,LMD 成形 304 不锈钢中复杂的晶粒形态及可能存在的微观缺陷,不仅直接关系到成形件的致密度,更深刻影响着其服役表现。因此,在分析微观演变机理的基础上,必须进一步从宏观角度评价其力学性能。

2.1 硬度

在激光熔化沉积制造过程中,其快速凝固特性导致的微观组织特征显著影响着最终产品的硬度表现。与传统铸造或锻造 304 不锈钢相比,激光熔化沉

积工艺形成的材料微观结构具有独特的特征,其硬度往往受到沉积参数、热循环过程以及后续处理工艺的综合影响^[39-40]。通过优化激光熔化沉积工艺参数,可以有效调控 304 不锈钢的微观组织,进而实现对材料硬度的精确控制。

Ma 等^[41]提出了一种将高效低成本的情性气体保护金属极电弧增材制造(metal inert gas-wire arc additive manufacturing, MIG-WAAM)与具有精细成形能力和优异性能的激光定向能量沉积(laser directed energy deposition, LDED)相结合的混合制造策略,比较了不同工艺下 304 不锈钢硬度。研究显示,电弧增材制造(wire arc additive manufacturing, WAAM)和 LDED 单道沉积样品的维氏显微硬度($HV_{0.2}$)分别达到 217 ± 2.65 和 234.67 ± 5.51 。如图 7 所示,混合制造沉积方向(SD)样品的硬度分布呈显著特征:WAAM 区域的硬度从下至上呈梯度递减,底部为 $(212.88 \pm 3.34) HV_{0.2}$,中部 $(208.13 \pm 3.38) HV_{0.2}$,顶部降至 $(189.44 \pm 4.05) HV_{0.2}$;而 LDED 区域的硬度稳定在 $(231.88 \pm 3.98) HV_{0.2}$,显著高于 WAAM 区域。这种硬度差异源于两种工艺的本质特征:LDED 工艺通过快速加热-冷却循环产生更大的温度梯度(达 $10^4 K/s$),结合初生枝晶间距的显著细化,促使晶粒尺寸从 WAAM 区域的粗大枝晶转变为 LDED 区域的细小柱状晶。

进一步探究硬度影响机理,发现晶粒尺寸和铁素

体对 304 不锈钢堆积层的硬度有较大影响。在Huang 等^[24]的研究中,水平方向上的等轴晶细小且含极少铁素体,因此具有较高的硬度(平均硬度为 203.6 HV);沉积方向上的柱状晶尺寸较大且含有约 10%铁素体,从而降低了硬度(平均硬度为 184.9 HV)。

总的来说,针对硬度性能的研究表明,LMD 工艺显著的快速冷却特性是提升 304 不锈钢显微硬度的关键,其机制在于极高的冷却速率细化了晶粒,并引入了高密度的位错结构。现有研究成功量化了不同沉积工艺及不同沉积方向对硬度的影响差异,指出了晶粒尺寸效应和相组成是决定硬度分布的主导因素。

2.2 拉伸性能

影响拉伸性能的主要因素是晶粒大小。晶粒越细,晶界密度越大,产生晶界强化效应使得抗拉强度越高^[42]。LMD 成型试样的晶粒大小介于 SLM 和传统锻造之间,抗拉强度和屈服强度高于锻造而低于 SLM^[43]。

研究表明,LMD 成型的 304 不锈钢试样拉伸断面形貌为等轴、形状大小相似、分布均匀的韧窝,为典型的塑性断裂形貌。试样断口中心处的韧窝较深,边缘处的韧窝较浅且具有一定的方向性,其原因是边缘处材料向中心收缩(图 8)^[44]。氧化、气孔等缺陷可能导致材料韧性降低,使伸长率减小。Wen 等^[45]提出了激光熔池边界滑移理论,对于激光增材制造的金

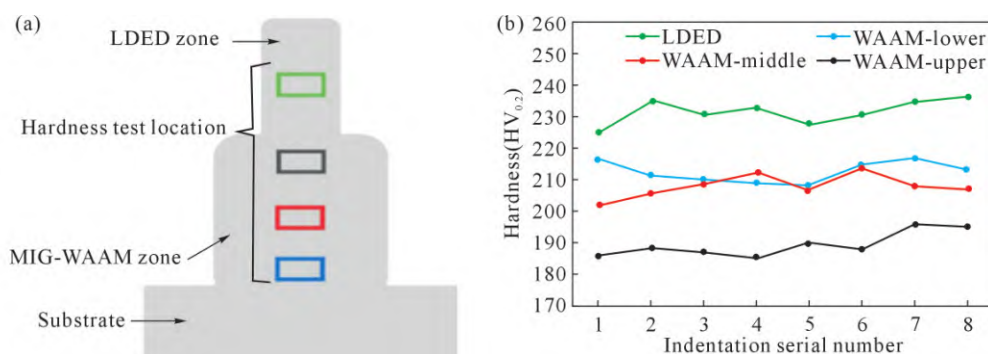


图 7 显微硬度:(a)显微硬度检测位置;(b)检测结果^[41]

Fig.7 Microhardness: (a) microhardness detection position; (b) test results^[41]

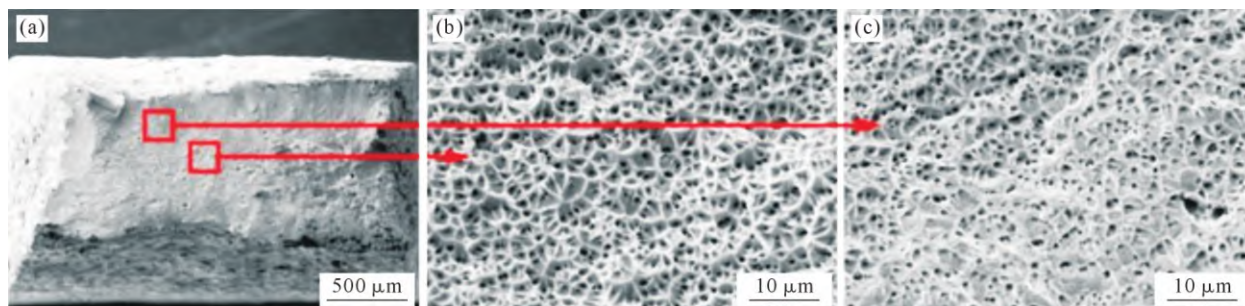


图 8 静态拉伸试样断裂形貌:(a)整体形态;(b)断口中心局部形貌;(c)断口边缘附近局部形貌^[44]

Fig.8 Fracture morphology of the static tensile sample: (a) overall morphology; (b) local morphology at the center of the fracture; (c) local morphology near the edge of the fracture^[44]

属零件而言,随着拉伸载荷增加,滑移将优先出现在结合力较弱的熔池边界。对于在不同方向上制备的拉伸试样,由于拉伸方向与熔池边界构成的滑移面之间的角度不同,到达临界剪切分应力的难易程度也不同。对于拉伸方向平行于扫描方向的试样,拉伸方向与熔池边界的滑移面平行,熔池边界发生滑移变得非常困难。而当拉伸方向垂直于扫描方向时,拉伸载荷与滑移面垂直,较容易发生滑移。这会使得激光增材制备的样品产生显著的力学各向异性。

戴晓琴等^[46]将 LMD 制造的 304 不锈钢与传统方法制造的 304 不锈钢拉伸性能进行比较,发现 LMD 制造 304 不锈钢的屈服强度与拉伸强度为传统制造 304 不锈钢的 1.2 倍以上,伸长率提高了 16.7%。这表明在 304 不锈钢零件的制造与修复上, LMD 方法具有一定的优势和潜力。

表1 激光熔化沉积 304 不锈钢的力学性能^[46]
Tab.1 Mechanical properties of 304 SS by LMD^[46]

Material	Yield strength /MPa	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation /%
Wrought 304 SS	460	586	50.2
LAM 304 SS	572	720	58.6

关于拉伸性能的研究证实了 LMD 成形 304 不锈钢在强度上优于传统锻造工艺,但也揭示了其力学性能存在显著的各向异性这一难题,强调在工程应用中必须考虑加载方向与沉积路径的匹配问题,同时也证实单纯依靠激光参数调控难以获得各向同性的力学性能。

3 超声能场调控 304 不锈钢组织及性能

尽管通过优化 LMD 工艺参数可以在一定程度上提升 304 不锈钢的力学性能,但沉积态组织中固有的外延生长柱状晶、显著的各向异性及累积的残余拉应力,仍是制约其高端工程化应用的关键瓶颈。现有的力学性能研究表明,单纯依靠激光成形过程中的热动力学调控难以完全消除这些不利因素,必须引入外部能场进行辅助处理。在众多后处理技术

中,超声微锻造因其独特的塑性变形机制和晶粒细化效应而备受关注,该技术不仅能有效愈合前述的微观缺陷,更能通过引入有益的压应力层显著改善材料疲劳性能。本部分将深入探讨超声能场对激光熔化沉积 304 不锈钢组织演变与性能提升的调控机理,为突破现有 LMD 成形件的性能极限提供新的技术路径。

进行超声微锻造时,金属零件表面受到高频率振动冲击,产生严重的塑形变形,且零件受到的作用力从表面向内部逐渐变小,会形成 3 个不同效果的作用区域:晶粒细化区、塑性变形区、应力释放区(图 9)^[47]。超声微锻造处理后零件表层产生了有益的压应力,使原有应力场的分布发生变化。如图 10 所示,超声处理后的 304 不锈钢试样表面残余应力状态由拉应力转变为压应力,当将微锻功率从 600 W 增加到 1 000 W 时,显微硬度提高的最大值逐渐从 90 HV_{0.1} 增加到 150 HV_{0.1}。同时,影响深度也逐渐从 0.6 mm 增加到 1.0 mm^[48]。由超声微锻造引起的宏观塑性变形,会直接产生晶体位错运动等现象。因此,材料内部的不稳定高能状态会向稳定低能状态转变,产生微观的塑性变形,从而使残余应力释放,大大降低残余应力,从而也降低了裂纹产生的可能。

微观组织表征显示,在微锻造前的 304 不锈钢中可观察到规则的枝晶微观结构,其由沿温度梯度方向分布的条纹状和点状偏析组成(图 11a)^[49]。经微锻造处理后,原始枝晶组织被破碎成小块,微观结构变得更加均匀(图 11b),同时形态从铸态向锻态转变。在微锻造前,晶界偏析易引发应力集中(图 12a);而在微锻造过程中,枝晶破碎为小块且晶粒变得圆润后,应力集中现象得到释放(图 12b)^[26]。这表明高频微锻造能够有效细化激光熔化沉积形成的晶粒。微锻前,抗拉强度在 537~801 MPa 之间,而微锻后,抗拉强度在 743~818 MPa 之间。微锻处理使平均抗拉强度提高了 15.36%,平均屈服强度也从微锻前的 378 MPa 提高到微锻后的 465 MPa。

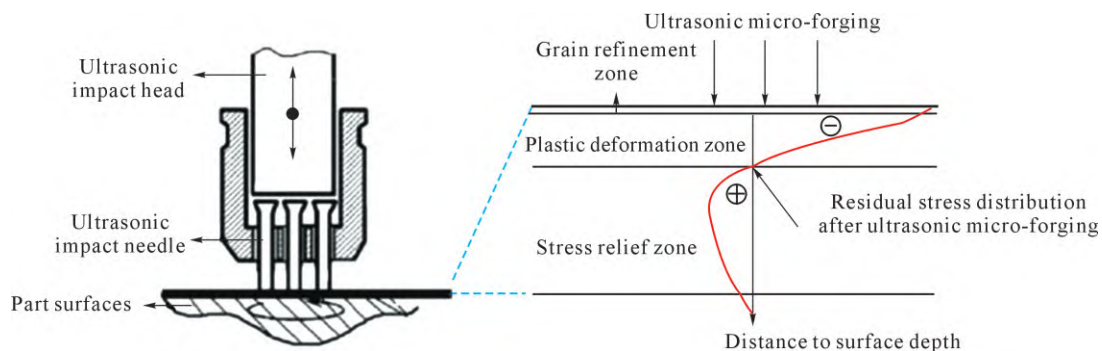
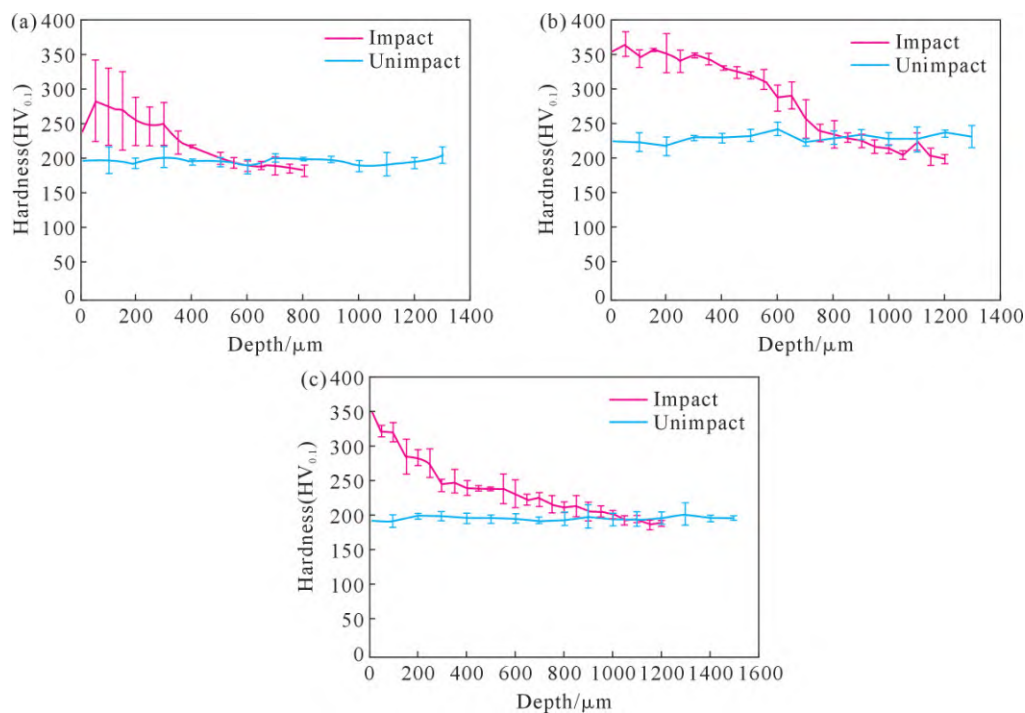
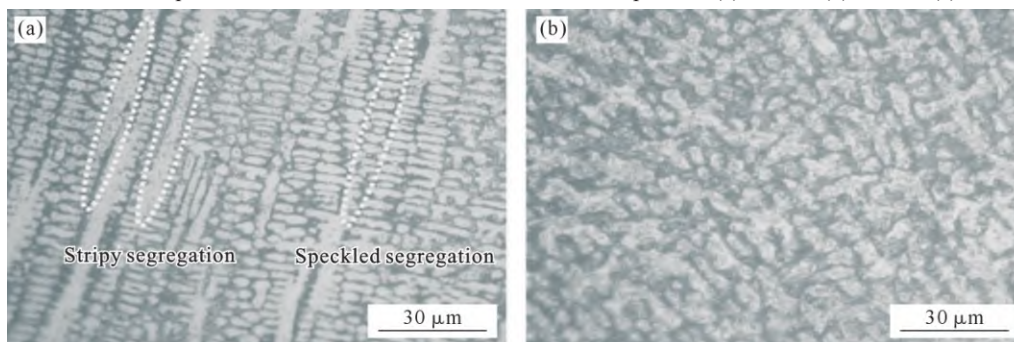
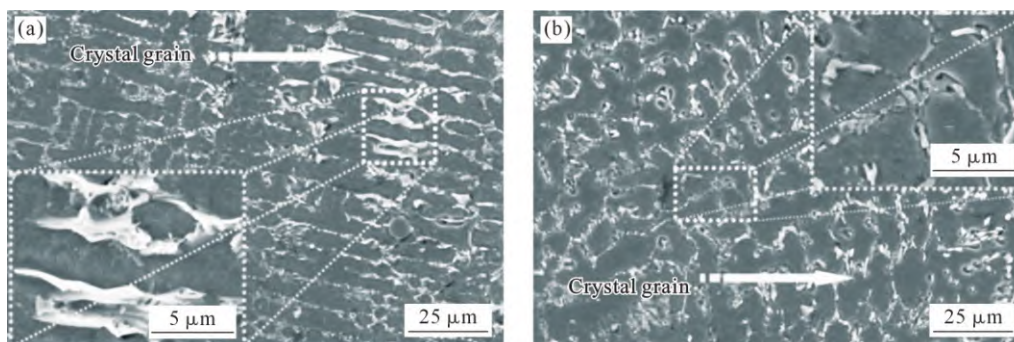


图9 超声微锻造示意图^[47]

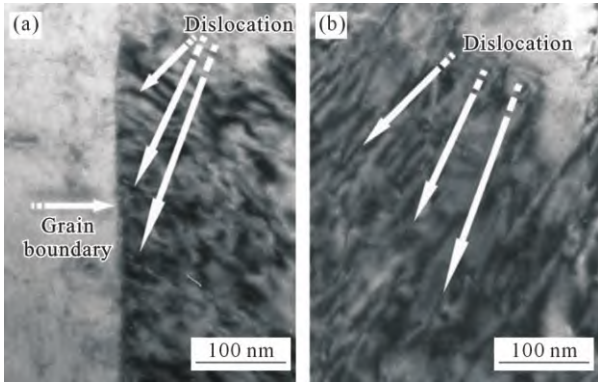
Fig.9 Schematic diagram of ultrasonic micro-forging^[47]

图 10 不同功率下处理后试样的硬度比较:(a) 600 W; (b) 800 W; (c) 1 000 W^[48]Fig.10 Hardness comparison between treated fabrications at different powers: (a) 600 W; (b) 800 W; (c) 1 000 W^[48]图 11 OM 下 304 不锈钢的显微组织:(a) 微锻前;(b) 微锻后^[49]Fig.11 OM of 304 stainless steel: (a) before micro-forging; (b) after micro-forging^[49]图 12 304 不锈钢的 SEM 像:(a) 微锻前;(b) 微锻后^[49]Fig.12 SEM image of 304 stainless steel: (a) before micro-forging; (b) after micro-forging^[49]

此外,施加微锻造前大量位错集中分布在晶界处(图 13a),这是由于熔融粉末快速冷却凝固过程中位错沿晶界析出,产生对机械性能有害的内应力。经微锻造处理后,位错重新分布为均匀的网络状结构(图 13b),在一定程度上消除了应力集中问题^[49]。

Wang 等^[50]指出在 304 不锈钢的激光熔化沉积过程中进行层间超声冲击处理,样品的晶粒结构从

主要由沿构建方向外延生长的柱状晶粒,转变为主要以等轴晶粒为主,如图 14 所示。并且样品内部孔隙数量减少,平均直径减少 62.4%。经过层间超声冲击处理使得材料硬度大幅提高,如图 15 所示。从试样的拉伸工程应力-应变曲线可以看出,如图 16 所示,经过超声冲击处理后,试样的平均屈服强度从 368.9 MPa 提高到 401.8 MPa,平均极限抗拉强度

图 13 304 不锈钢的 TEM 图像:(a) 微锻前;(b) 微锻后^[49]Fig.13 TEM image of 304 stainless steel: (a) before micro-forging; (b) after micro-forging^[49]

(UTS)从 589.7 MPa 提高到 622.9 MPa,平均伸长率

从 40.7%提高到 46.9%。

为了分析超声冲击处理(ultrasonic impact treatment, UIT)对增材制造零件组织和性能的影响效果,Zhou 等^[51]提出了一种计算模型,用于预测增材制造零件在 UIT 过程中产生的冲击应力场以及塑性变形区深度。传统计算模型基于一个假设:每次冲击前,冲击针头处于静止且无应力的初始状态。然而在实际超声冲击处理过程中,针头的部分动能会消耗于样品的弹塑性变形,剩余能量则导致针头以一定速度回弹。该回弹的针头随后被变幅杆再次激发和加速,并以更高的速度再次冲击样品表面。该修正模型旨在为增材制造(AM)与超声冲击处理相结合的混合工艺参数的快速优化提供理论支撑。

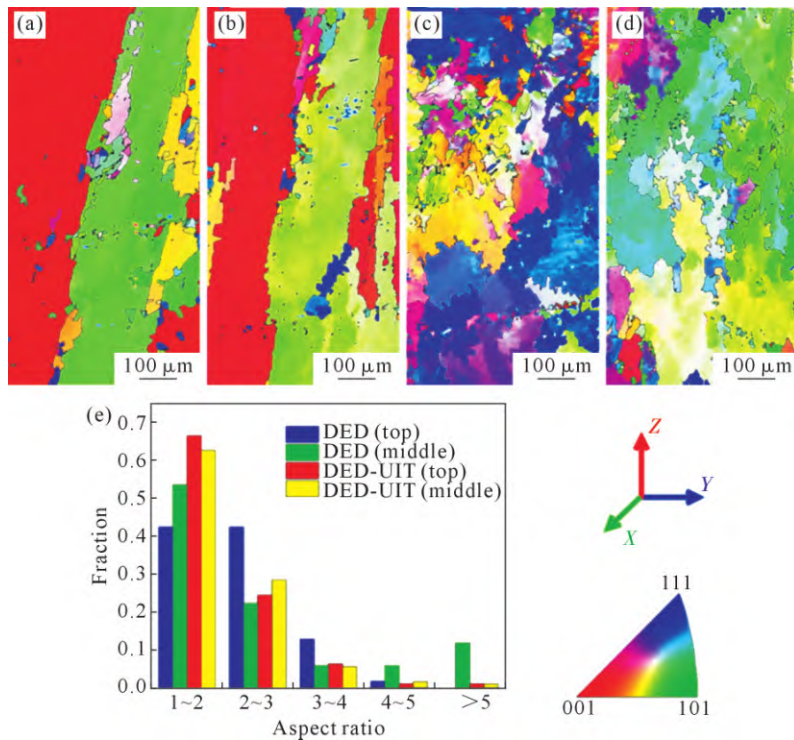
图 14 反极图(IPF)取向图沿构建方向的不同位置:(a) DED(顶部);(b) DED(中部);(c) DED-UIT(顶部);(d) DED-UIT(中部);(e) 不同样品纵横比^[50]

Fig.14 Inverse pole figure (IPF) orientation maps at different positions along the build direction: (a) DED (top); (b) DED (middle); (c) DED-UIT (top); (d) DED-UIT (middle); (e) aspect ratio for different samples^[50]

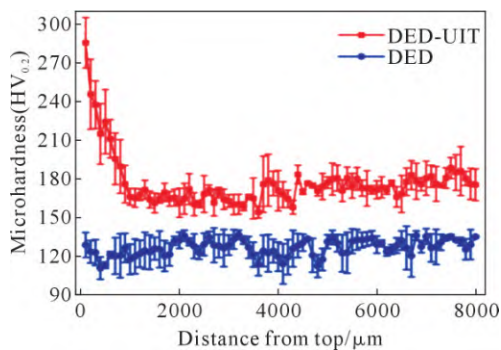
图 15 304 不锈钢试样超声冲击前后显微硬度比较^[50]

Fig.15 Comparison of the microhardness of 304 stainless steel before and after ultrasonic impact^[50]

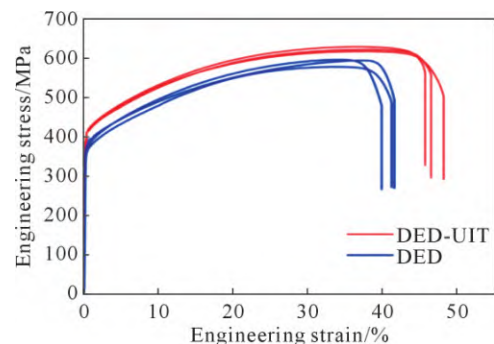
图 16 304 不锈钢试样超声冲击前后工程应力应变曲线^[50]

Fig.16 Engineering stress-strain curves of 304 stainless steel plate samples before and after ultrasonic impact^[50]

$$(\sigma_r)_{\text{cor}} = -\frac{(\sqrt{\rho E})_{\text{pin}}}{1+n} \cdot \frac{v_{\text{max}} f_0}{r}$$

$$= -\frac{(\sqrt{\rho E})_{\text{pin}}}{1+n} \cdot \frac{4\pi r_0}{1-R} \cdot \frac{fA}{r} \quad (1)$$

$$(\sigma_\theta)_{\text{cor}} = \frac{v}{1-v} (\sigma_r)_{\text{cor}} = -\frac{v}{1-v} \cdot \frac{(\sqrt{\rho E})_{\text{pin}}}{1+n} \cdot \frac{4\pi r_0}{1-R} \cdot \frac{fA}{r} \quad (2)$$

$$(r_{\text{max}})_{\text{cor}} = \frac{1-2v}{1-v} \cdot \frac{(\sqrt{\rho E})_{\text{pin}}}{1+n} \cdot \frac{4\pi r_0}{1-R} \cdot \frac{fA}{\sigma_{p0.2}} \quad (3)$$

$$n = \sqrt{\frac{(\rho E)_{\text{pin}}}{(\rho E)_{\text{AM}}}} \quad (4)$$

式中, $(\sigma_r)_{\text{cor}}$ 、 $(\sigma_\theta)_{\text{cor}}$ 、 $(\bar{\sigma})_{\text{cor}}$ 和 $(r_{\text{max}})_{\text{cor}}$ 为 UIT 过程中冲击应力场和塑性变形区深度修正后的结果; f 为超声换能器振动频率; A 为变幅杆端振幅; $\sigma_{p0.2}$ 为被处理试样高应变率条件下压缩屈服强度; R 为反射率, 其值与被处理试样材料参数有关, 当被处理试样材料为钢、钛合金及铝合金时, 其可设定为 0.85、0.80 和 0.73; r_0 为冲击针半径; n 为冲击针和被处理试样弹性波阻抗比; ρ 和 E 为密度和弹性模量; 下标“pin”

和“AM”分别代表冲击针和被处理试样材料参数; v 为被处理试样的泊松比。

Zhou 等^[52]采用有限元模拟与实验结合的方式研究 304 不锈钢沉积试样经 UIT 后, 其塑性变形区以探索 UIT 处理后试样残余应力分布。通过 EBSD 数据, 可以得到试样内 UIT 之后塑性变形区的晶粒取向差分布。304 不锈钢沉积试样 UIT 前后其晶界分布图分别如图 17a 和 b 所示^[29]。通过对 UIT 前后沉积试样内晶界分布图进行比较, 发现 UIT 之前试样内晶界分布比较均匀, 小角晶界数量较少; 经 UIT 之后, 在距离被处理试样表面 1 mm 深度范围之内, 小角晶界数量明显增多。经 UIT 之后, 大量小角晶界出现的原因是因为被处理试样表面一定深度范围内发生了较大程度的塑性变形, 高的应变能将促进位错移动和重组为位错墙, 以形成小角度晶界和亚晶的方式来降低应变能。图 17c 和 d 所示为 304 不锈钢沉积试样 UIT 前后其 KAM 值分布, 对比发现 UIT 之前试样内其 KAM 值分布比较均匀且其值较

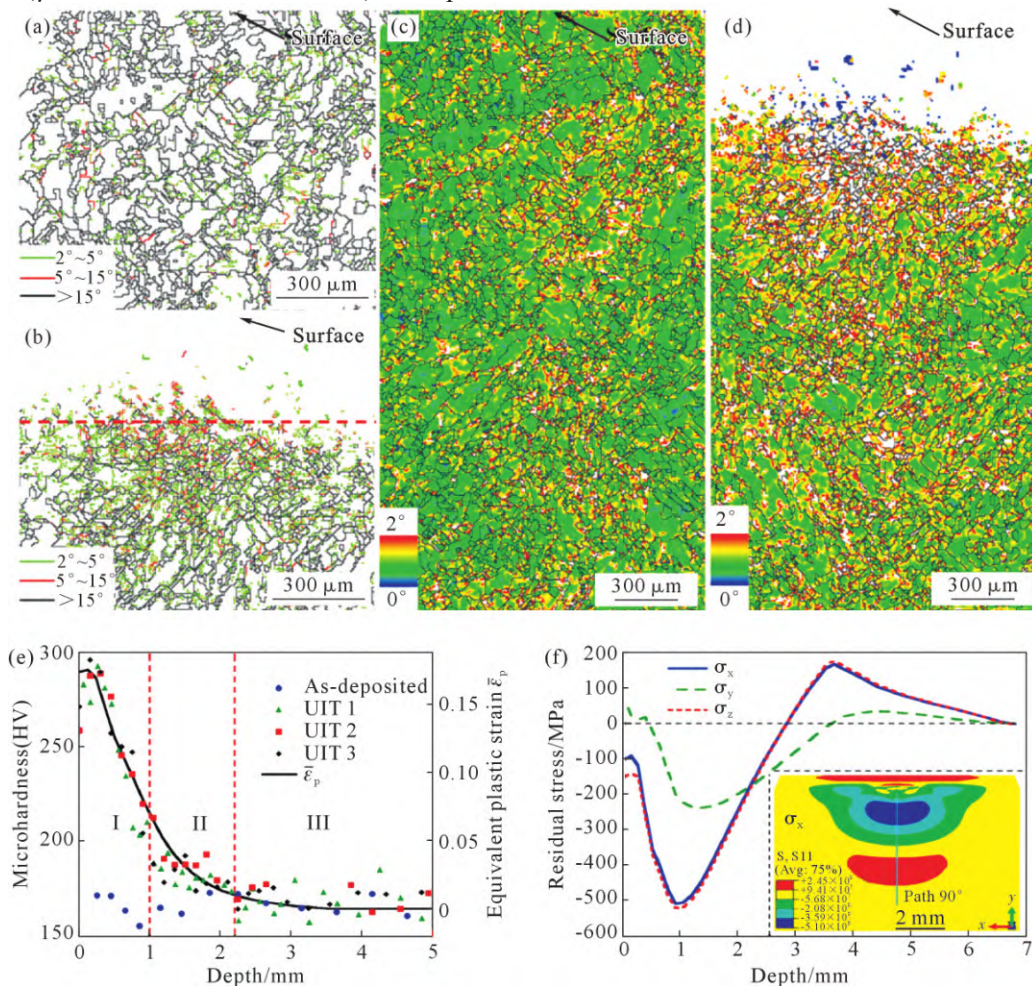


图 17 沉积态 304 不锈钢样品: (a, b) 经 UIT 处理前后的 EBSD 晶界分布图; (c, d) 处理前后的样品核平均取向差(KAM)图; (e) 沉积态样品与 UIT 处理后样品显微硬度值的散点图; (f) UIT 处理后沉积态样品中上的 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 残余应力分布^[52]

Fig.17 EBSD grain boundary distribution maps: (a, b) as-deposited and UIT-treated 304 stainless steel samples; (c, d) KAM maps of untreated and treated samples; (e) scatter plot of microhardness values for as-deposited and UIT-treated samples; (f) residual stress distributions of σ_x , σ_y , and σ_z in the UIT-treated as-deposited sample^[52]

小;而沉积试样在经过 UIT 之后,在深度 2 mm 范围内其 KAM 值较未经处理的试样有明显增加,说明此区域范围内沉积材料发生一定程度塑性变形。

图 17e 所示为 304 不锈钢沉积试样 UIT 前后,其显微硬度值沿深度方向分布。从图中可以看出UIT处理后,304 不锈钢沉积试样的显微硬度分布分为 3 个区域:区域 I(深度范围<1 mm),硬度显著升高,大幅塑性变形;区域 II(深度范围 1~2.2 mm),硬度适度增加并稳定,适度塑性变形;区域 III(深度范围>2.2mm),硬度与未处理试样一致,无塑性变形。等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}_p$ 代表塑性变形程度的大小,数值计算的等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}_p$ 结果如图 17c 和 f 所示。由图 17f 发现,304 不锈钢沉积试样经过 UIT 之后,塑性变形区内产生一定程度的压缩残余应力,将沉积试样初始拉应力状态转化为压应力状态。

引入超声微锻造主要解决了 LMD 成形 304 不锈钢中存在的晶粒粗大和高残余拉应力这两个核心问题。现有研究通过实验表征与数值模拟,证明了超声冲击处理能够通过剧烈塑性变形机制,将原本有害的拉应力场转变为有益的压应力场,并利用位错增殖与重排诱导晶粒细化。这一技术路径不仅显著提升了材料的表面硬度和抗疲劳潜力,也为突破 LMD 成形件“性能各向异性”和“易开裂”的技术瓶颈提供了一种高效、低成本的后处理解决方案。

4 总结及展望

随着金属激光增材制造技术的发展,304 不锈钢的激光熔化沉积成为其中一个研究方向。学者们在 304 不锈钢的 LMD 制备这一方向上做了大量研究,取得了一定成果,同时仍面临着不少挑战,相关研究工作仍有待完善,主要体现在以下方面。

(1)304 不锈钢粉末在 LMD 过程中经历快速加热和快速冷却,显微组织、化学成分及力学性能容易出现明显的各向异性,熔池冷却收缩后出现较大残余拉应力,容易出现气孔、裂纹等缺陷,影响零件的力学性能。因此,调控显微组织和改善力学性能成为 LMD 制造 SS304 亟需解决的一大问题。

(2)在 LMD 工艺中,通过合理控制工艺参数、优化扫描策略、施加一定方式的后处理等,可有效改善缺陷产生的情况。激光熔化沉积与超声微锻造、超声冲击等技术结合的复合加工,使 LMD 304 不锈钢零件的组织及性能有明显改善。近年来备受瞩目的增材-铣削增减材复合加工方法或微铸锻铣复合增材制造技术,有望成为制造高性能 304 不锈钢零件的另一种途径。

(3)目前超声辅助 LMD 成形 304 不锈钢的研究多聚焦于沉积后的超声冲击或微锻造处理,即主要利用固态下的表面塑性变形来强化材料,而关于超声能场在熔池液相凝固阶段(如超声空化、声流效应)的作用机理研究很少。考虑到 304 与 316L 不锈钢在热物理性质上的高度相似性,未来研究可借鉴超声辅助 LMD 成形 316L 合金的最新进展,重点探究超声在 304 不锈钢熔池中的动力学行为:①研究超声空化效应是否能够通过增强非均质形核及冲击波导致的枝晶破碎机制,增加结晶核心;②分析声流效应如何通过搅拌熔体来降低温度梯度并均匀化溶质分布。以此验证上述机制能否在 304 不锈钢中有效诱导“柱状晶-等轴晶转变”,从而实现从液相凝固控制到固态形变强化的全流程组织调控。

(4)现有研究主要集中在硬度、静拉伸等基础静态力学指标,缺乏对材料在实际交变载荷下服役行为的深入探讨。未来的研究重点应从静态性能向动态性能转移,系统开展高/低周疲劳性能、裂纹萌生与扩展机制以及循环加载响应的研究,并补充冲击韧性与不同环境下的耐腐蚀性能数据。旨在构建涵盖静态与动态、宏观与微观的综合材料性能数据库,为 LMD 成形 304 不锈钢关键构件的疲劳寿命预测与工程化安全应用提供核心数据支撑。

综上所述,通过对 304 不锈钢等金属材料的激光增材制造过程进行加工工艺优化和技术创新,实现多技术复合加工和多尺度多维度数值模拟,进一步完善各种材料的组织与力学性能数据库,实现不同材料、不同工艺的数据互通,将大力推动金属增材制造领域的进一步发展。

参考文献:

- [1] 侯英培,万杰,杨海欧,林鑫,陈豫增.基于高碳奥氏体稳定化的激光定向能量沉积 H13 钢力学性能优化[J].铸造技术,2025,46(11): 1058-1066.
HOU Y P, WAN J, YANG H O, LIN X, CHEN Y Z. Optimization of the tensile properties of H13 steel deposited by laser directional energy based on high-carbon austenite stabilization[J]. Foundry Technology, 2025, 46(11): 1058-1066.
- [2] 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.
- [3] 王林增,于君,林鑫,龙振宇,邬良怡,牛毅豪.激光定向能量沉积 Ti-18Zr-13Mo 亚稳 β 生物钛合金组织与性能研究[J].铸造技术,2025,46(2): 144-152.

- WANG L Z, YU J, LIN X, LONG Z Y, WU L Y, NIU Y H. Study of the microstructure and properties of Ti-18Zr-13Mo metastable β biomedical titanium alloys by laser directed energy deposition[J]. Foundry Technology, 2025, 46(2): 144-152.
- [4] FENG L T, WEN X, CUI X F, JIN G, LU B W, DONG Z, LIU X H, CHEN D, LI F H. Si-doping improves the mechanical and tribological properties of LDED FeMnCoCrSix high entropy alloys: Synergistic effects of TRIP and multiple strengthening mechanisms[J]. Tribology International, 2026, 215(Part B): 111469.
- [5] 黄西娜, 何磊, 岳文, 翟月雯, 王成彪. 激光熔化沉积镍基高温合金微观组织及力学性能的研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2023, 33(6): 101-109.
- HUANG X N, HE L, YUE W, ZHAI Y W, WANG C B. Research progress on microstructure and mechanical properties of nickel based superalloys deposited by laser melting[J]. Powder Metallurgy Industry, 2023, 33(6): 101-109.
- [6] 陈永宁, 肖华强, 褚梦雅, 莫太寿. 激光熔化沉积 TiAl 合金的组织与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(3): 679-687.
- CHEN Y N, XIAO H Q, CHU M Y, MO T Q. Microstructure and mechanical properties of TiAl alloy fabricated by laser melting deposition[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2025, 54(3): 679-687.
- [7] BRUZZO F, MEDAPATI M P R, PULLINI D, RONCO F, BERTINETTI A, TOMMASI A, RIEDE M, LÓPEZ E, BRÜCKNER F. Sustainable laser metal deposition of aluminum alloys for the automotive industry[J]. Journal of Laser Applications, 2022, 34(4): 042004.
- [8] NGUYEN Q B, ZHU Z, NG F L, CHUA B W, NAI S M L, WEI J. High mechanical strengths and ductility of stainless steel 304L fabricated using selective laser melting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(2): 388-394.
- [9] 袁梦雨, 韦春贝, 代明江, 陈玲, 林松盛, 石倩. 渗铬温度对 304 不锈钢渗铬层组织结构与性能的影响[J]. 表面技术, 2025, 54(17): 1-21.
- YUAN M Y, WEI C B, DAI M J, CHEN L, LIN S S, SHI Q. Influence of chromizing temperature on the structure and properties of 304 stainless steel surface technology[J]. Surface Technology, 2025, 54(17): 1-21.
- [10] MAHMOOD M A, POPESCU A C, OANE M, CHIOIBASU D, POPESCU-PELIN G, RISTOSCU C, MIHAILESCU I N. Grain refinement and mechanical properties for AISI304 stainless steel single-tracks by laser melting deposition: Mathematical modelling versus experimental results[J]. Results in Physics, 2021, 22: 103880.
- [11] ELGAZZAR H, ABDEL-SABOUR H, ABDEL-GHANY K. Cost-effective laser metal deposition of 304L stainless steel for repairing and enhancing 316L and mild steel engineering components[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 32665.
- [12] SASINDRAN J, NARAYANAN J A, HEBBAR H S, BALLA V K, BONTA S. Synergistic influence of laser scanning strategies and heat treatments on the microstructure-mechanical property relationship of laser directed energy deposited austenitic stainless steel 304[J]. Optics & Laser Technology, 2026, 193: 114342.
- [13] UR REHMAN A, MAHMOOD M A, PITIR F, SALAMCI M U, POPESCU A C, MIHAILESCU I N. Mesoscopic computational fluid dynamics modelling for the laser-Melting deposition of AISI 304 stainless steel single tracks with experimental correlation: A novel study[J]. Metals, 2021, 11(10): 1569.
- [14] QI S W, HUANG G J, XU X R, ZHANG H, DAI D H, XI L X, LIN K J, GU D D. Effect of laser process parameters on thermal behavior and residual stress of high-strength aluminum alloy processed by laser powder bed fusion[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 3756-3768.
- [15] SHAO J Y, YU G, HE X L, LI S X, CHEN R, ZHAO Y. Grain size evolution under different cooling rate in laser additive manufacturing of superalloy[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105662.
- [16] HUANG G J, GU D D, DAI D H, YUAN L H, WANG R, XIONG K. Microstructure evolution and underlying thermal behavior of high-content TiC reinforced titanium matrix composites fabricated by laser directed energy deposition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 3007-3022.
- [17] ZHANG H, DAI D H, YUAN L H, LIU H, GU D D. Temperature gradient induced tough-brittle transition behavior of a high-strength Al-4.2Mg-0.4Sc-0.2Zr alloy fabricated by laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2023, 73: 103655.
- [18] SOLTANIPOUR A, HEYDARZADEH SOHI M, SHOJA-RAZAVI R, BAREKAT M, ERFANMANES M. Effect of processing parameters on the microstructure of laser-clad Stellite 6 on the X19CrMoNbVN11-1 stainless-steel substrate[J]. Heliyon, 2024, 10(9): e30176.
- [19] 肖鱼. 金属薄壁结构激光增材制造成形工艺及组织性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- XIAO Y. Process, microstructure and properties of metal thin-walled structure by laser additive manufacturing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.
- [20] SHARMA S, KRISHNA K V M, JOSHI S S, RADHAKRISHNAN M, PALANIAPPAN S, DUSSA S, BANERJEE R, DAHOTRE N B. Laser based additive manufacturing of tungsten: Multi-scale thermo-kinetic and thermo-mechanical computational model and experiments[J]. Acta Materialia, 2023, 259: 119244.
- [21] CHAI R X, ZHANG Y P, ZHONG B, ZHANG C W. Effect of scan speed on grain and microstructural morphology for laser additive manufacturing of 304 stainless steel[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2021, 60(1): 744-760.
- [22] CUI C, WENG Z J, GU K X, ZHANG M L, WANG J J, ZHANG Y. The strengthening role of post-welded cryogenic treatment on the performance and microstructure of 304 austenitic stainless steel weldments[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 5576-5584.
- [23] KADOI K, KOGURE M, INOUE H. Effect of ferrite morphology on pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel weld metals[J]. Corrosion Science, 2023, 221: 111356.
- [24] HUANG W B, ZHANG Y M, DAI W B, LONG R S. Mechanical properties of 304 austenite stainless steel manufactured by laser metal deposition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 758: 60-70.
- [25] SHI Y L, LI W C, TIAN L, SUN Y H, ZHANG J L, JING H Y, ZHAO L, XU L Y, HAN Y D. Effect of ferrite and grain boundary

- characteristics on corrosion properties of thermal simulated 316L heat affected zone[J]. Corrosion Science, 2023, 222: 111384.
- [26] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, KING W E. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones [J]. Acta Materialia, 2016, 108: 36-45.
- [27] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, MUKHERJEE T, ELMER J W, MILEWSKI J O, BEESE A M, WILSON-HEID A, DE A, ZHANG W. Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties [J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.
- [28] TANG Y T, PANWISAWAS C, GHOUSSOUB J N, GONG Y, CLARK J W G, NÉMETH A A N, MCCARTNEY D G, REED R C. Alloys-by-design: Application to new superalloys for additive manufacturing[J]. Acta Materialia, 2021, 202: 417-436.
- [29] WANG L, ZHANG Y, CHIA H Y, YAN W. Mechanism of keyhole pore formation in metal additive manufacturing[J]. npj Computational Materials, 2022, 8(1): 22.
- [30] QU M, GUO Q, ESCANO L I, NABAA A, HOJJATZADEH S M H, YOUNG Z A, CHEN L. Controlling process instability for defect lean metal additive manufacturing[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1079.
- [31] CHEN L Q, YAO X L, TAN C L, HE W Y, SU J L, WENG F, CHEW Y X, NG N P H, MOON S K. In-situ crack and keyhole pore detection in laser directed energy deposition through acoustic signal and deep learning[J]. Additive Manufacturing, 2023, 69: 103547.
- [32] HU J W, XUE J B, LIU L L, LIU Y M, LI M M, WANG F T, PENG W. Study on the effect of dynamic chemical polishing treatment on porous titanium alloy scaffolds fabricated using laser powder bed fusion[J]. Materials & Design, 2024, 237: 112580.
- [33] GRADL P, CERVONE A, COLONNA P. Influence of build angles on thin-wall geometry and surface texture in laser powder directed energy deposition[J]. Materials & Design, 2023, 234: 112352.
- [34] NI C B, ZHU J J, ZHANG B G, AN K, WANG Y Q, LIU D J, LU W, ZHU L D, LIU C F. Recent advance in laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V alloys: microstructure, mechanical properties and machinability [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2025, 20 (1): e2446952.
- [35] LIUTS, CHEN P, QIU F, YANG H Y, JIN N T Y, CHEW Y, WANG D, LI R, JIANG Q C, TAN C. Review on laser directed energy deposited aluminum alloys[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(2): 022004.
- [36] 张亚普. 基于熔池温度监控的激光熔覆层成形研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- ZHANG Y P. Research on laser cladding layer forming based on temperature monitoring of molten pool[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [37] WANG A, WEI Q L, TANG Z J, REN P Y, ZHANG X L, WU Y, WANG H W, DU PLESSIS A, HUANG J, HU K M, WANG H Z. Effects of processing parameters on pore defects in blue laser directed energy deposition of aluminum by in and ex situ observation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 319: 118068.
- [38] ARRIZUBIETA J I, LAMIKIZ A, CORTINA M, UKAR E, ALBERDI A. Hardness, grainsize and porosity formation prediction on the laser metal deposition of AISI 304 stainless steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 135: 53-64.
- [39] ORAON S, GORAI R, SHUKLA S, MUJUMDAR S, SINGH R. Experimental characterization and defect mapping of coaxial wire laser directed energy deposition of AISI 304 [A]. Proceedings of the ASME 2025 20th International Manufacturing Science and Engineering Conference[C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2025. V001T03A009.
- [40] KUMAR R, DAS A K. A comprehensive review of AISI 304 steel based on different thick coating process[J]. Materials Today: Proceedings, 2024, 98: 180-186.
- [41] NIU F Y, BI W M, ZHANG K J, SUN X, MA G Y, WU D J. Additive manufacturing of 304 stainless steel integrated component by hybrid WAAM and LDED[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 106227.
- [42] LI W Q, MENG L X, WANG S, ZHANG H Y, NIU X F, LU H H. Plastic deformation behavior and strengthening mechanism of SLM 316L reinforced by micro-TiC particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 884: 145557.
- [43] ZHANG Y M, HUANG W B. Comparisons of 304 austenitic stainless steel manufactured by laser metal deposition and selective laser melting [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 324-333.
- [44] 李凯凯. 激光熔覆 304 不锈钢及其热挤压强化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- LI K K. Study on laser cladding 304 stainless steel and its enhancement by hot extrusion[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [45] WEN S F, LI S, WEI Q S, YAN C Z, SHENG Z, SHI Y S. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2660-2667.
- [46] 戴晓琴, 陈瀚宁, 雷剑波, 顾振杰, 周圣丰. 激光增材制造 304 不锈钢显微结构特征与性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(16): 83-86.
- DAI X Q, CHEN H N, LEI J B, GU Z J, ZHOU S F. Study on microstructure characteristics and properties of 304 stainless steel by laser additive manufacturing[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(16): 83-86.
- [47] 张美霞. 超声冲击辅助选区激光熔化成形研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- ZHANG M X. Study on ultrasonic impact treatment assisted selective laser melting[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [48] SUN L B, JIANG F C, YUAN D, SUN X J, SU Y, GUO C H. Effects of ultrasonic micro-forging on 304 stainless steel fabricated by WAAM[A]. Proceedings of the TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings[C]. Chain: Springer International Publishing, 2019. 251-258.
- [49] ZHANG Y, QIU C J, CHEN Y, YU J S, ZHOU J, LI L S, WANG Z C. Influence of high-frequency micro-forging on microstructure

- and properties of 304 stainless steel fabricated by laser rapid prototyping[J]. Steel Research International, 2013, 84(9): 870-877.
- [50] WANG J D, XUE Y, XU D, ZENG Y Z, LI L Q, WANG Z Q, JIANG F C. Effects of layer-by-layer ultrasonic impact treatment on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel manufactured by directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2023, 68: 103523.
- [51] ZHOU C P, JIANG F C, XU D, GUO C H, ZHAO C Z, WANG Z Q, WANG J D. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 280: 116599.
- [52] ZHOU C P, WANG J D, GUO C H, ZHAO C Z, JIANG G R, DONG T, JIANG F C. Numerical study of the ultrasonic impact on additive manufactured parts[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 197: 106334.

(责任编辑:李亚敏)