

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.6075

激光增材制造高熵合金疲劳行为研究进展

陆子洋^{1,2,3}, 陈 辉^{1,2,3}, 丁红瑜^{1,2,3}, 陈 超^{1,3}, 徐 龙^{1,2,3}

(1. 江苏科技大学 海洋装备研究院, 江苏 镇江 212003; 2. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003; 3. 江苏省船舶与海洋工程设计研究院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 激光增材制造高熵合金因其独特的跨尺度不均匀组织及工程应用潜力而备受关注,但其疲劳性能仍是制约工程化应用的关键瓶颈。基于此,本文系统梳理了激光增材制造高熵合金的疲劳行为研究进展。现有研究表明,其疲劳失效机制呈现出由缺陷主导向组织主导的转变趋势。其中,在疲劳早期阶段,缺陷尺寸、形状及其连通性起主导作用;而在疲劳裂纹萌生后,晶格旋转、形变孪晶、内应力分布以及析出相等因素进一步决定裂纹扩展行为及其速率。进一步对不同合金体系的对比分析表明,析出强化型高熵合金通常表现出更高的疲劳抗力,因而有望成为提升疲劳性能的重要研究方向。基于此,本文提出后续研究应融合缺陷控制与组织调控,建立面向激光增材制造的疲劳预测与评估体系,并以应用需求为牵引,推动高熵合金工程化转化与应用。

关键词: 激光增材制造; 高熵合金; 疲劳行为; 失效机制

中图分类号: TG146.2; TG111.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)06-0590-18

Research Progress on the Fatigue Behavior of Laser Additively Manufactured High-entropy Alloys

LU Ziyang^{1,2,3}, CHEN Hui^{1,2,3}, DING Hongyu^{1,2,3}, CHEN Chao^{1,3}, XU Long^{1,2,3}

(1. Institute of Marine Equipment, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 3. Jiangsu Ship and Ocean Engineering Design and Research Institute, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Laser additive manufactured high-entropy alloys (HEAs) have emerged as a class of structurally promising materials owing to their intrinsic engineering potential and the formation of heterogeneous microstructures across multiple length scales. Despite these advantages, the fatigue performance remains a major barrier to their reliable structural application. In this review, recent progress in understanding the fatigue behavior of laser additive manufactured HEAs was systematically assessed. Current findings indicate that the governing fatigue failure mechanism evolves from a defect-dominated regime to a microstructure-mediated regime. At the early stage of fatigue damage, premature failure is primarily controlled by the size, morphology, and interconnectivity of process-induced defects. Once cracks are initiated, their subsequent growth is further modulated by microstructural features, including lattice rotation, deformation twinning, the partitioning of high- and low-strain regions, and precipitate interfaces, all of which contribute to variations in crack propagation kinetics. Cross-system comparisons further reveal that precipitation-strengthened HEAs generally exhibit superior fatigue resistance, highlighting their particular promise for future alloy design. In light of the current limitations, future research should move beyond isolated defect mitigation or microstructural optimization and instead integrate both aspects into a unified framework for fatigue prediction and performance evaluation tailored to laser additive manufacturing. Such an approach is expected to accelerate the engineering translation of HEAs and facilitate application-driven demonstration and validation under service-relevant conditions.

Key words: laser additive manufacturing; high-entropy alloys; fatigue behavior; failure mechanisms

收稿日期: 2026-04-20

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52401212); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20241020); 镇江市科技计划基础研究(JC2025034); 镇江市科协青年科技人才托举工程(ZJTJ-2025-020); 镇江市国际科技合作计划项目(GJ2023011)**作者简介:** 陆子洋, 2001 年生, 硕士生。研究方向为增材制造高熵合金疲劳。Email: lu6714463@163.com**通信作者:** 徐 龙, 1993 年生, 博士, 讲师。研究方向为金属增材制造, 高熵合金强化、疲劳性能等。Email: l.xu2023@just.edu.cn**引用格式:** 陆子洋, 陈辉, 丁红瑜, 陈超, 徐龙. 激光增材制造高熵合金疲劳行为研究进展[J]. 铸造技术, 2026, 47(6): 590-607.

LU Z Y, CHEN H, DING H Y, CHEN C, XU L. Research progress on the fatigue behavior of laser additively manufactured high-entropy alloys[J]. Foundry Technology, 2026, 47(6): 590-607.

激光增材制造(laser additive manufacturing, LAM)作为一种新兴的先进制造技术,通过激光逐层熔化金属粉末实现复杂构件的近净成形^[1-4]。与传统铸造技术相比,LAM技术在结构设计灵活性、材料利用率及制造周期等方面具有显著优势。高熵合金(high-entropy alloys, HEAs)因其独特的多主元效应和可调控的微观结构,极大地拓宽了材料研发体系,并展现出优异的综合性能^[5-6]。将LAM与HEAs相结合,既充分发挥了增材制造的设计灵活性和高集成度优势,又拓展了HEAs的应用范围,已成为材料科学与工程领域的重要研究方向^[7]。然而,与静态拉伸或压缩等基础力学性能相比,LAM制造HEAs的疲劳性能是制约其工程应用的关键瓶颈。激光成型过程中的快速凝固与复杂热历史会引入柱状晶粒、织构、位错胞结构等主要特征的非平衡凝固组织,同时伴随孔隙、未熔合缺陷、激光扫描轨迹、表面未熔颗粒和残余应力等制造缺陷,这些因素共同主导循环塑性演化与裂纹萌生/扩展过程,显著增加了研究其疲劳行为的复杂性^[8]。

基于对疲劳机理深层认识的需求,LAM制造HEAs的疲劳研究已从单纯的性能表征逐步走向失效机制的揭示。就晶体结构而言,当前研究主要集中于FCC结构HEAs,特别是单相FCC体系的疲劳性能^[9-10]。而BCC结构HEAs因制造成本高、硬度强度高但塑性相对较弱,相关疲劳研究极为稀缺,多限于铸造块体合金的初步探索^[11-13]。与此同时,亚稳态HEAs中相变诱导的循环强化^[14]、孪晶强化带来的裂纹尖端钝化^[15],以及位错胞/亚结构网络对疲劳损伤^[16]的调控等机制已成为解释其优异疲劳抗力的重要切入点。而对于析出强化型HEAs,析出相的共格/非共格特性及其对滑移带演化、位错和析出相相互作用与裂纹扩展路径偏转的影响也正在被揭示^[17]。然而,从研究的广度和深度看,LAM制造HEAs疲劳性能研究仍处于早期阶段,存在若干共性的关键科学问题亟待突破。首先,不同体系间的疲劳失效机理存在差异性,统一的疲劳评价机制未完全建立,难以对LAM疲劳失效行为形成系统认识。其次,缺陷、微观结构与疲劳损伤演化之间的定量关联仍较薄弱,导致疲劳寿命预测模型的精度有限、适用范围受限。此外,热处理、机加工、超声表面滚压等后处理手段对疲劳性能的提升机制缺乏深层的机制解释,难以形成统一的设计准则。

基于上述现状与问题,本文围绕LAM制造HEAs的疲劳行为展开系统梳理。从LAM的组织特征出发,聚焦疲劳失效的主要节点(萌生、扩展与最终断

裂),归纳各环节失效规律,系统总结析出相、孪晶/相变、位错胞亚结构及扫描策略等结构对疲劳损伤演化的影响机制。同时,结合热处理、机加工与超声表面滚压等后处理手段,阐明疲劳性能提升机制与技术难点,旨在为LAM制造HEAs疲劳机理的深入研究、寿命预测和工程化设计提供理论参考与研究方向。

1 LAM制造HEAs的结构特征

LAM过程中复杂的热历史与非平衡凝固行为,使得LAM制造HEAs形成区别于传统铸造或锻造材料的跨尺度不均匀组织。这种组织通常表现为从宏观熔池形貌到微观晶粒,再到亚晶结构的不均匀特征,并伴随制造过程引入的缺陷与残余应力等缺陷组织。对于HEAs而言,其多主元效应、严重晶格畸变以及可能的多相结构,使得其在LAM过程中的组织演化更加复杂。一方面,快速凝固可细化晶粒并提高强度;另一方面,不均匀组织与工艺缺陷会显著降低疲劳寿命。

1.1 工艺特征与热历史

LAM是一种典型的非平衡快速凝固过程,其核心特征在于局部瞬时熔化与快速凝固的反复循环,这一复杂热历史直接决定了材料的初始组织状态(图1)。LAM过程中冷却速率($10^5 \sim 10^8$ K/s),显著高于传统加工方法,从而导致晶粒显著细化并形成亚稳组织^[18]。对于HEAs而言,多主元体系中各原子难以实现充分扩散与均匀化,导致凝固过程中出现成分偏析和非均匀组织^[19]。这些非均匀特征一方面通过细晶强化提高材料强度,另一方面也可能在局部形成力学性能不匹配区域,从而对疲劳裂纹萌生产生不利影响^[20]。

此外,LAM过程中显著的温度梯度($10^5 \sim 10^7$ K/m)会驱动定向凝固,形成沿构建方向生长的柱状晶及明显织构,这一现象在多种FCC和BCC结构HEAs中已有报道^[19-21]。这种由热流主导的晶体取向分布,使材料在不同加载方向下表现出明显的各向异性疲劳行为^[22]。进一步地,由于逐层沉积工艺特征,已凝固材料在后续加工过程中会经历多次热循环,这种重复热输入可导致局部组织演化甚至相结构转变,例如亚结构重排或析出行为变化^[23-24]。这种空间上不均匀的热历史会加剧组织差异,从而影响裂纹扩展路径及其稳定性。

1.2 跨尺度不均匀组织

LAM制造HEAs的一个核心特征在于其显著的跨尺度不均匀组织。增材制造金属材料通常呈现

从纳米到微米的跨尺度组织分布^[25-26],而在 HEAs 体系中,这种不均匀性由于多元效应和非平衡凝固进一步强化。具体而言,在纳米尺度上,材料内部可能存在短程有序结构(short-range order, SRO)^[27]、纳米析出相^[28]及显著的元素偏析^[29],这些结构与严重晶格畸变共同影响位错运动行为^[23];在亚微米尺度,快速凝固诱导形成高密度位错胞或细胞状结构,成为材料强化的重要来源;在微米尺度上,柱状晶、等轴晶及其织构分布决定了材料的各向异性力学响应^[30];在更高尺度上,熔池结构及其周期性边界反映了热输入与凝固行为的空间分布^[24];而在宏观尺度,

孔隙、未熔合等制造缺陷则成为疲劳裂纹的主要萌生源^[31]。

1.2.1 熔池结构

熔池结构是 LAM 过程中最具代表性的宏观组织特征之一。典型的熔池呈现出半椭圆或鱼鳞状形貌,并沿扫描轨迹周期性排列(图 1b)。在 HEAs 中,由于其复杂的成分体系与热物性参数差异,熔池形貌及其边界特征往往更加复杂,例如熔池边界处可能伴随更明显的元素偏析或组织突变^[28,36-38]。熔池结构的形成主要受激光扫描过程中局部热输入与熔体动力学行为控制。高能量密度条件下,熔池内部存在显著

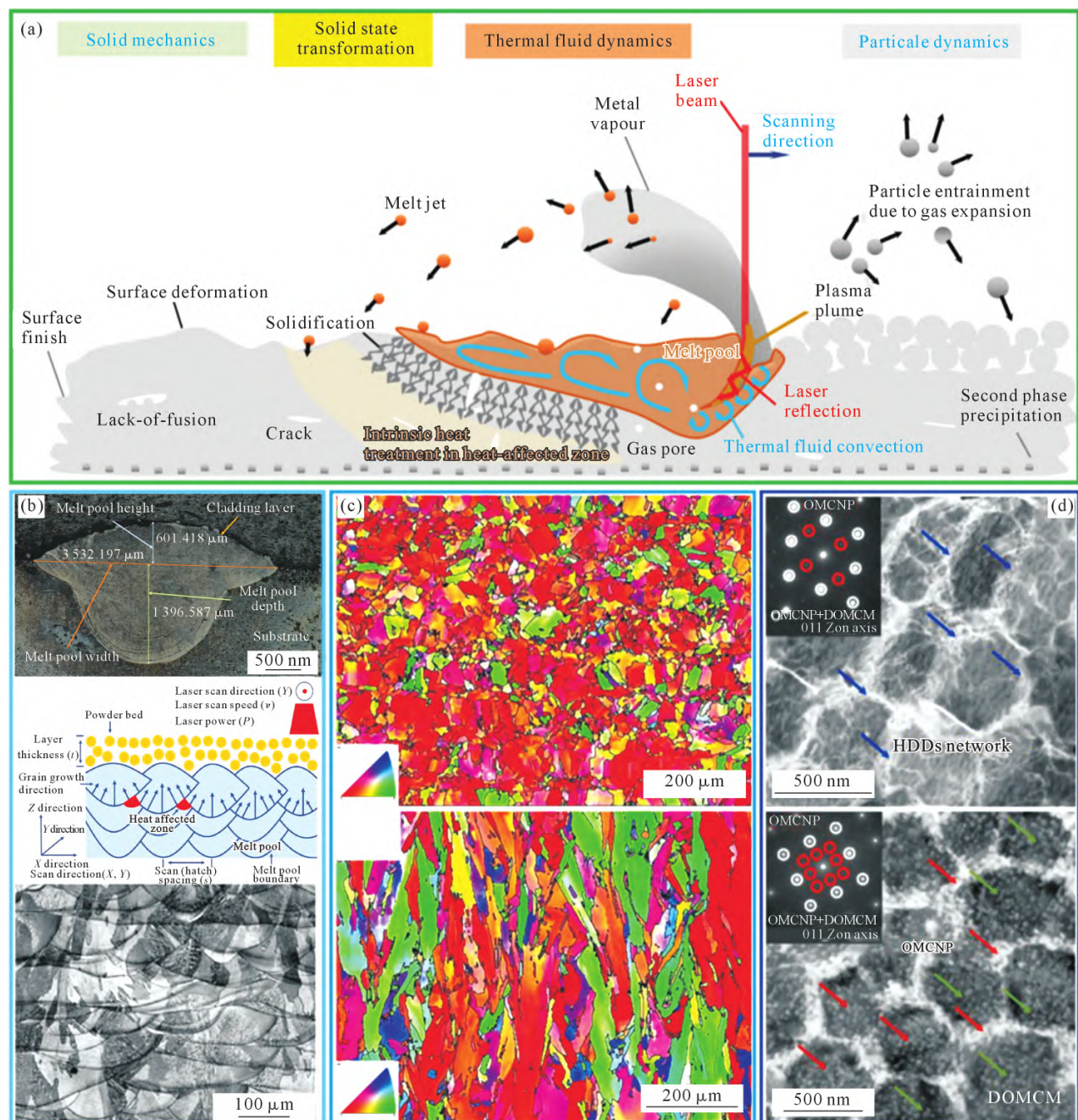


图 1 LAM 过程及典型特征组织:(a) LAM 过程激光与粉末作用示意图;(b) 单道熔池和多道次熔池;(c) 柱状晶粒;(d) 位错胞或位错胞结构^[23,32-35]

Fig.1 LAM process and typical structures: (a) schematic illustration of the interaction between the laser and powder during the LAM process; (b) single-track melt pool and multi-track melt pool; (c) columnar grains; (d) dislocation cells or dislocation cellular structures^[23,32-35]

的温度梯度与表面张力梯度,从而诱导 Marangoni 对流,促进熔体内部的物质传输与再分布,最终影响熔池尺寸、流动模式及最终成形质量^[39]。此外,气-液反应及表面活性元素会显著改变表面张力梯度,进而影响 Marangoni 对流行为,并最终作用于缺陷形成和显微组织演化^[40]。

从力学性能角度看,熔池结构具有双重效应。一方面,熔池内部的细晶结构与高位错密度有助于提高材料强度;另一方面,熔池边界由于组织不连续性与潜在缺陷富集,往往成为应力集中区域,从而优先诱导疲劳裂纹萌生。在 LAM 合金中,裂纹常沿熔池边界扩展,尤其是在存在未熔合缺陷或元素偏析的情况下^[41-43]。

1.2.2 晶粒形貌与织构

在 LAM 过程中,由于熔池内存在显著的温度梯度(G)与凝固速率(R),晶粒通常沿热流方向外延生长,形成以柱状晶为主导的组织形貌(图 1c)。当 G/R 较高时有利于柱状晶稳定生长,而随着局部过冷度增加及溶质再分配增强,则可能触发柱状晶向等轴晶的转变。该过程受热梯度、凝固动力学及多道热循环的耦合作用控制,并在高熵/中熵合金中同样适用^[44]。多层沉积形成的复杂热历史使晶粒呈现明显的取向依赖性,并在晶粒内部形成沿特定取向生长的细胞状亚结构,二者协同构建了从位错胞结构—晶粒形貌—织构的跨尺度不均匀组织,其中 FCC 结构 HEAs 中常见 $\langle 001 \rangle$ 沿构建方向的择优取向^[35,45]。

柱状晶与织构对力学性能的影响具有显著的双重性。一方面,柱状晶及强织构有利于提高沿特定方向的强度与刚度,其外延生长特征及取向一致性可促进塑性协调变形^[46-47]。另一方面,柱状晶及织构会导致不同加载方向下性能差异显著,尤其是在疲劳或循环载荷条件下,这种差异会通过裂纹萌生与扩展行为被进一步放大^[48-49]。相比之下,等轴晶结构由于取向分布更加随机,通常具有更均匀的力学响应,但可能以牺牲部分强度为代价。因此,如何在柱状晶强化与等轴晶均匀性之间实现平衡,成为 LAM 制造 HEAs 组织调控的重要研究方向。

1.2.3 位错胞组织

LAM 金属中普遍存在以位错胞为特征的亚晶组织(图 1d),其形成机制目前主要存在两种解释。一方面,传统观点认为该结构来源于多层沉积过程中的循环热加载与局部塑性变形,在快速加热-冷却过程中引入高密度位错并通过回复与重排形成位错胞结构^[16,50];另一方面,位错胞结构本质上起源于

快速凝固阶段,共晶反应($L \rightarrow \delta + \gamma$)产生的高热应力和两相间的晶格失配、热膨胀系数差异导致大量位错积累,形成位错胞结构^[51]。这两种机制往往协同作用,使位错胞结构同时具备凝固起源和后续演化的复合特征。

从力学性能角度来看,这种亚结构通过位错强化和溶质偏聚双重机制显著提升材料强度,同时其空间取向与分布特征还会影响塑性变形与疲劳行为。高密度位错胞壁可作为位错运动的障碍,提高屈服强度,而胞内相对较低的位错密度则有助于维持一定塑性^[50]。位错胞边界处常伴随元素偏析,这在后续热处理或服役过程中可促进纳米析出相/第二相的形核与长大,从而形成以位错网络为骨架、析出相为强化单元的协同结构(dislocation-precipitate skeleton, DPS)^[23]。因此,亚结构作为连接凝固过程与力学响应的关键细观尺度单元,在强化机制与损伤演化中发挥着双重作用。

1.3 缺陷特征及其形成机制

LAM 过程中,由于极端的热梯度、快速凝固速率以及复杂的多道多层热循环,不可避免地产生多尺度缺陷。这些缺陷主要来源于熔池内不稳定的流动行为、能量输入波动以及粉末铺展与熔化不充分等过程,其类型通常包括内部缺陷、表面及形态缺陷以及裂纹缺陷等^[52]。在 HEAs 多元体系中,复杂的成分分布与多相组织使得缺陷形成机制更加复杂,同时也为缺陷控制与性能优化带来新的机遇与挑战^[53]。从力学性能角度来看,缺陷是影响增材制造金属材料可靠性的关键因素之一。

1.3.1 内部缺陷

内部缺陷主要包括孔隙与未熔合缺陷(lack of fusion, LOF),二者在形成机制与形态特征上存在明显差异。孔隙通常起源于熔池内气体滞留或不稳定的熔池动力学行为,例如匙孔(keyhole)塌陷、气体卷入以及挥发元素形成的气泡等,其形貌多呈近球形或椭圆形,并具有相对光滑的内壁。匙孔形成是激光能量导致金属蒸发产生反冲压力,当反冲压力超过液体表面张力和静压力时,在熔池中形成深而窄的蒸汽空腔。匙孔壁面受力不平衡引发波动和坍塌,被固化前沿捕获后形成匙孔孔隙缺陷^[57]。而未熔合缺陷则主要由能量密度不足或扫描策略不合理导致粉末未完全熔化或相邻熔道/熔层之间结合不充分,其形态通常呈不规则片状或裂隙状,并沿熔道边界或层间界面分布。

从机械性能角度考虑,内部缺陷是疲劳裂纹萌生的主要控制因素。LOF 缺陷由于其尖锐的边界形

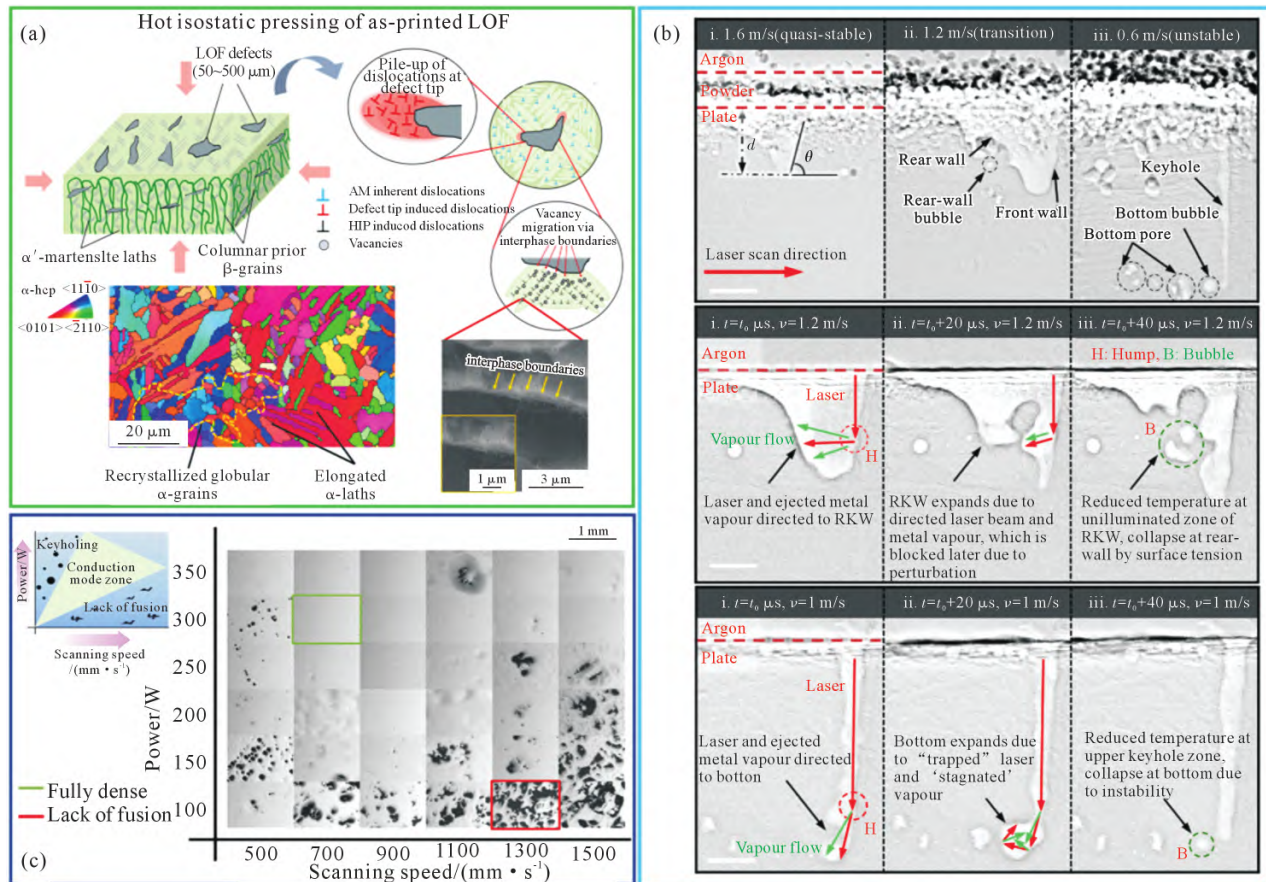


图2 内部制造缺陷:(a) LAM 过程形成的未熔合缺陷及其后处理过程;(b) 匙孔形成过程;(c) 激光扫描策略与不同类型孔之间的关系^[54-56]

Fig.2 Internal manufacturing defects: (a) lack-of-fusion defects formed during the LAM process and their post-processing route; (b) keyhole formation process; (c) relationship between laser scanning strategy and different types of pores^[54-56]

态和较大的尺寸,产生的应力集中系数比等体积球形气孔高约 40%,对疲劳寿命的负面影响最为显著^[58]。即使在高度优化的工艺参数下,内部缺陷的存在仍可导致疲劳强度降低近 50%,并引入 2~3 个数量级的疲劳寿命离散性^[59]。研究表明,传统的基于缺陷尺寸的评估方法往往低估了不规则内部缺陷的危害性。采用深度学习与多尺度仿真相结合的方法,能够更准确地预测含不规则熔合不良缺陷材料的疲劳性能,预测精度可达 90%以上^[59]。

1.3.2 外部缺陷

外部缺陷主要包括构件表面或与表面连通的缺陷与形貌特征,典型包括表面连通孔隙、表面暴露的未熔合缺陷、粉末球化黏附及边界不规则引起的几何精度偏差等。阶梯效应(staircase effect)是表面缺陷的主要成因,即由于逐层堆叠过程中层厚固有的存在,导致构件表面呈现阶梯状形貌^[60](图 3a)。此外,激光功率、扫描速度、填充间距等工艺参数会显著影响熔池动力学行为,进而决定表面质量。当能量输入不足时,熔池润湿性差,容易形成球化现象(balling)和不规则表面形貌。球化缺陷是由液态金属表面能最小化原理驱动的,当熔池温度过低或表

面张力过高时,液态金属倾向于聚集成球状以降低表面积^[61](图 3b)。球化现象主要发生在低线能量密度(LED<200 J/m)条件下,当熔池宽长比超过 11.3 时,会发生 Plateau-Rayleigh 不稳定性导致的熔池断裂和球化^[62]。当能量过高时,则可能引起金属汽化、飞溅(splatter)以及锁眼不稳定性,同样导致表面质量劣化(图 3c)。飞溅缺陷主要由熔池表面反冲压力、金属蒸汽流以及锁眼不稳定性引起,会造成粉末床扰动和表面污染^[63-64]。

增材制造金属材料的表面粗糙度通常在 Ra 4~30 μm (SLM 工艺)或 Ra 25~130 μm 范围内(EBM 工艺),显著高于传统制造工艺^[67]。高表面粗糙度不仅直接影响疲劳强度和裂纹萌生行为,还会影响腐蚀抗力和磨损性能。特别是在复杂内部几何结构中,由于无法进行后处理加工,原始表面粗糙对构件性能的制约作用更加明显。此外,表面连通孔隙会为腐蚀介质提供渗透通道,加速材料的环境损伤过程^[68]。

1.3.3 裂纹缺陷

裂纹缺陷是 LAM 中最严重的结构缺陷类型。根据形成机制及发生阶段,LAM 中的裂纹缺陷主要分为发生于凝固末期的凝固裂纹、发生于后续热

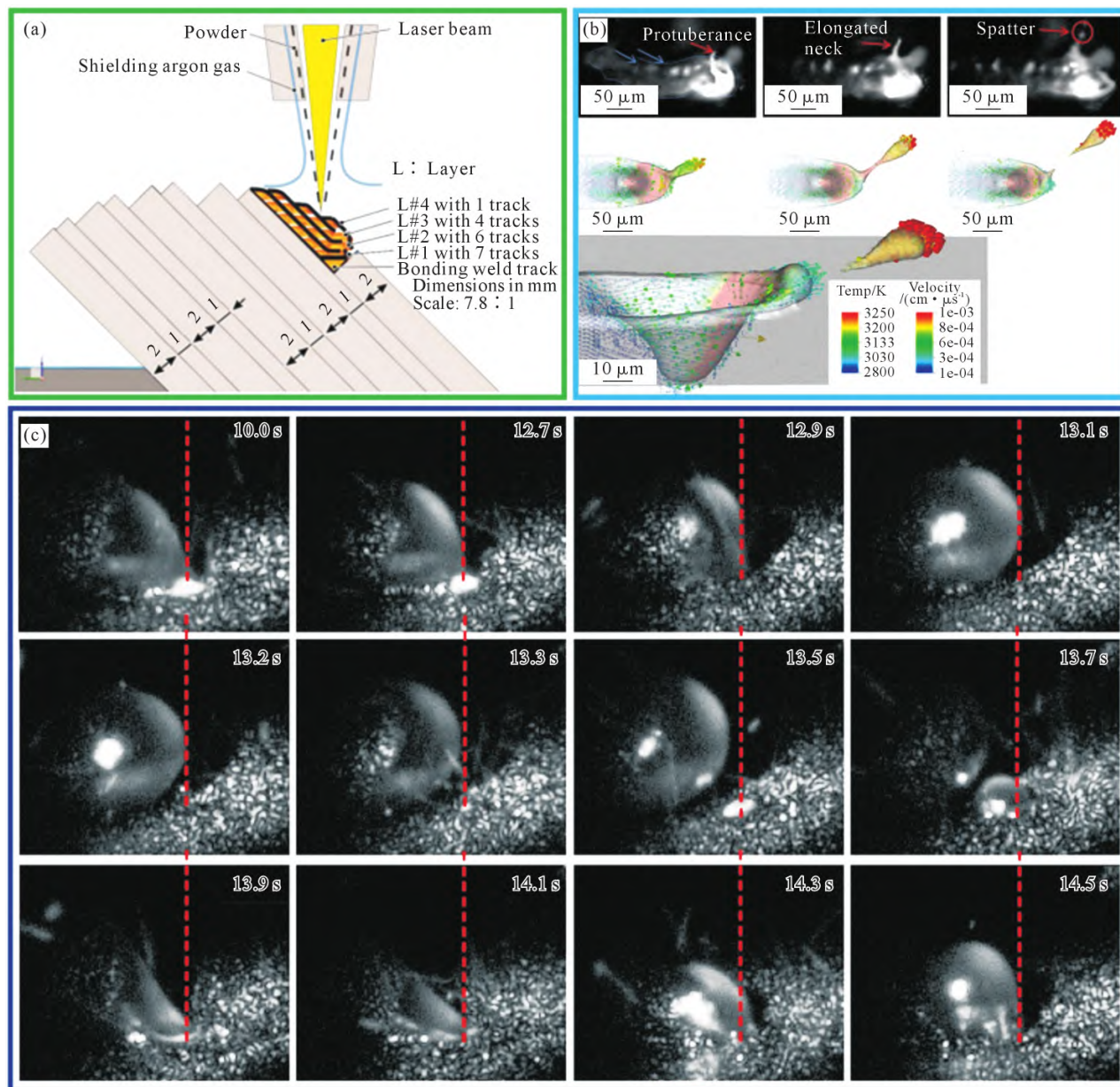


图3 表面制造缺陷:(a) LAM 构建表面的台阶效应;(b)球形缺陷形成过程;(c)飞溅缺陷形成过程^[61,65-66]

Fig.3 Surface manufacturing defects: (a) stair-step effect on the surface of the LAM-built part; (b) formation process of spherical defects; (c) formation process of spatter defects^[61,65-66]

循环过程中晶界局部再熔化的液化裂纹,以及发生于完全固态温度区间内因延性下降和应变局部化引起的固态裂纹(如应变时效裂纹等)^[69]。在 LAM 制造 HEAs 中,由于复杂的多元组织特征和快速非平衡凝固过程,裂纹形成机制更加复杂多样。

LAM 制造过程裂纹是最为常见的裂纹类型,主要包括凝固裂纹和液化裂纹两种(图 4a 和 b)。凝固裂纹通常发生在熔池凝固的最后阶段,当残余液膜无法有效补充凝固收缩时形成^[69]。凝固裂纹的形成机制与多个因素密切相关,包括凝固温度范围、凝固路径、枝晶间液膜稳定性和元素偏析等。此外,凝固裂纹的敏感性与晶界取向差密切相关,当晶界取向差角度超过 30°时,裂纹敏感性显著增加^[70]。液化

裂纹则发生在热影响区,由低熔点相的重新熔化和随后的开裂导致。这种裂纹通常沿枝晶间区域分布,与元素偏析密切相关^[69],热应力是驱动裂纹形成的关键因素。LAM 过程中的极高温梯度和快速冷却速率导致显著的热收缩不均匀性,当热应力超过材料的拉伸强度时即发生开裂。

激光工艺参数选择和后处理工艺对材料组织应力演变与裂纹形成的影响同样不可忽视。热处理过程中,析出相的形成会产生额外的收缩应力,叠加原有残余应力后可能超过材料的承载能力而产生微裂纹^[71](图 4c)。激光工艺参数的优化是控制裂纹形成的重要手段。采用功率递减的脉冲激光可将 AA6061 铝合金的热裂纹体积减少约 50%,这主要归因于较

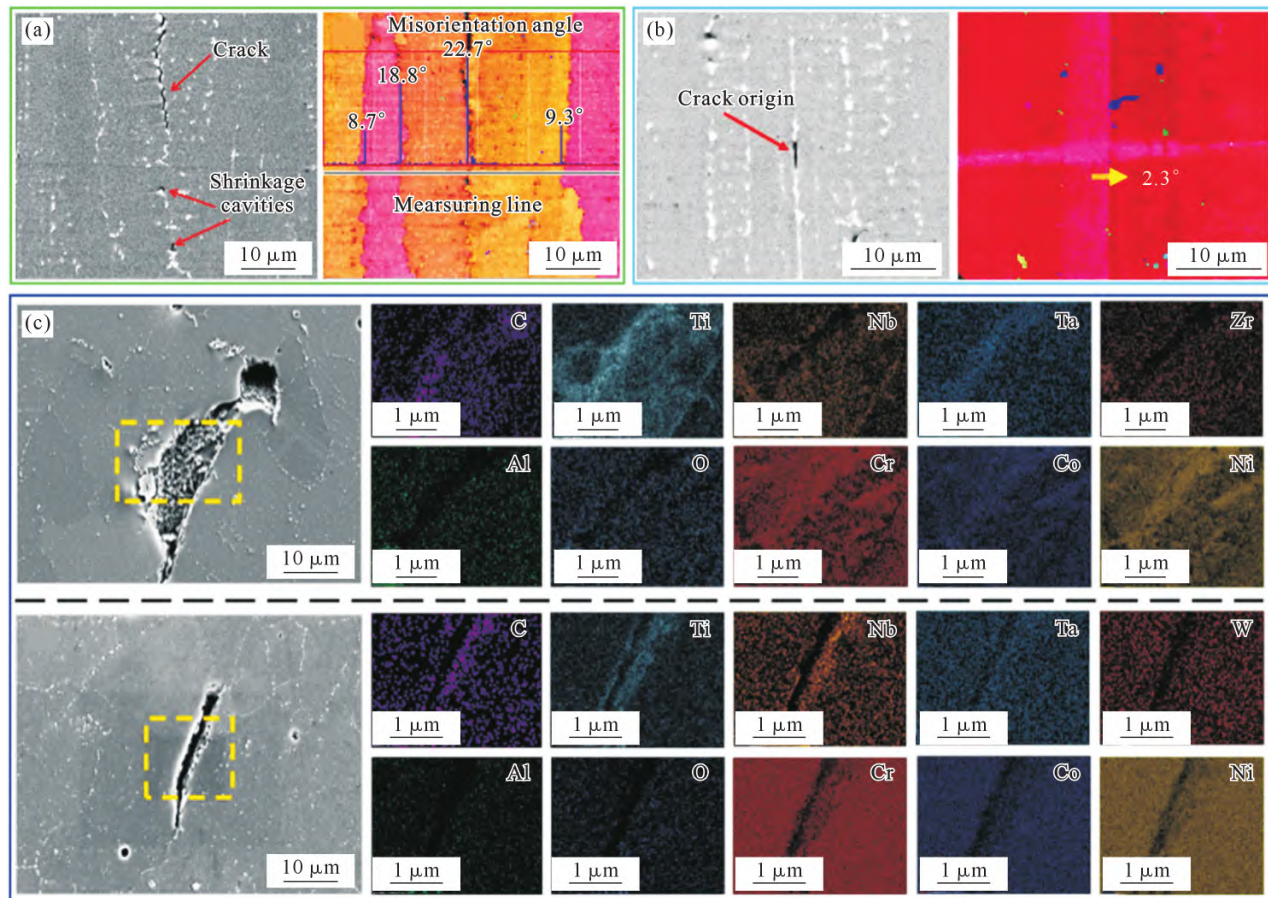


图4 LAM 过程中的裂纹:(a)凝固裂纹;(b)液化裂纹;(c)应变时效裂纹^[70]

Fig.4 Cracks during the LAM process: (a) solidification cracking; (b) liquation cracking; (c) strain-aging cracking^[70]

低的凝固速率和温梯度降低了热撕裂敏感性^[72]。在 HEAs 制造中, 还通过热力学规则指导合金成分设计, 开发具有本征抗热裂性能的多主元镍基 HEAs。保持高(Al+Ti)含量(7.4%, 质量分数)的同时, 通过优化液相线/固相线温度、缩小凝固温度区间、抑制 γ' 相析出和脆性相形成等方式, 实现抗裂性与超高强度的协同优化^[45]。

因此, 裂纹缺陷的形成是材料固有特性、工艺参数和热历史的综合结果。通过合理的合金成分设计(如 BCC 向 FCC 转变)、工艺参数优化和后处理策略, 可以有效抑制裂纹形成, 这为机械性能提升提供了重要基础。

2 LAM 制造 HEAs 疲劳与断裂行为研究进展

疲劳失效是工程结构失效的主要原因, 约占结构失效案例的 90%。LAM 制造 HEAs 作为新兴的先进材料体系, 其疲劳性能的研究对于推动该技术的工程化应用具有重要意义。传统疲劳失效机制主要包括裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂 3 个阶段, 其中裂纹萌生通常占高周疲劳总寿命的 90%~95%。根据应力水平和循环次数, 疲劳可分为低周疲劳(LCF,

$N < 10^4$)、高周疲劳(HCF, $10^4 < N < 10^7$)和超高周疲劳(VHCF, $N > 10^7$)3 个区域。

通常, 疲劳过程包含 3 个基本阶段, 即裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂。在无缺陷条件下, 裂纹萌生阶段占高周疲劳总寿命的 90%~95%。对于传统制造材料, 裂纹萌生的微观机制已被充分理解, 主要包括滑移带诱导、缺陷诱导和晶界诱导机制等。然而, 增材制造材料的疲劳行为与传统制造材料存在显著差异。增材制造金属的静态强度通常可以达到甚至超过传统工艺水平。但其疲劳性能通常认为显著劣于传统锻造态或轧制态材料。Murakami 等^[73]基于表观疲劳极限与理想疲劳极限的比值定义了增材制造材料的疲劳分级系统, 发现未经后处理的试样被归类为最差等级, 其疲劳极限仅为理想疲劳强度的 10%~30%。增材制造材料疲劳性能劣化的根本原因包括: ①随机分散的工艺缺陷(孔隙、LOF、微裂纹)作为应力集中源显著缩短裂纹萌生寿命; ②微观结构的非均匀性和各向异性导致疲劳数据散布显著; ③粗糙的表面质量和复杂的残余应力进一步恶化疲劳性能。值得注意的是, 当通过机加工消除表面缺陷、热等静压处理消除固有缺陷后, 增材制造材料的疲劳强度可恢复甚至超越传统材料^[74], 这意味着增材

制造材料疲劳极限与极限抗拉强度之间的线性关系依然成立,其本征疲劳强度甚至可能超过传统材料。

作为结构材料,LAM制造HEAs的疲劳研究仍处于起步阶段,主要受4个因素制约:①HEAs粉末制备、打印及后处理的综合成本显著高于传统合金,限制了大规模疲劳试验的开展。②LAM过程中成分偏析、裂纹与孔隙等缺陷易发,批次间一致性难以保证,给疲劳数据的可重复性带来挑战。③HEAs在静态载荷下的失效机理研究尚未成熟,强化机制、相稳定性与热历史的耦合关系等基础科学问题仍在不断完善,制约了对循环载荷下疲劳行为的深入研究。④HEAs目前缺乏明确的工程应用场景牵引,相关标准与评估体系尚未建立,实际工况下的验证数据严重不足。与此同时,LAM赋予HEAs显著的跨尺度不均匀组织特征,为进一步深入研究奠定良好基础。但是这种跨越多个数量级的不均匀组织使HEAs的疲劳行为呈现出3个典型特征。首先, $S-N$ 曲线离散性显著,由缺陷随机分布与组织非均匀性共同驱动。其次,疲劳极限强烈依赖于缺陷尺寸与表面状态,近表面缺陷的存在可使疲劳寿命降低1~2个数量级。最后,FCC/BCC/HCP单相及多相、析出强化型和亚稳态TRIP/TWIP型等不同HEAs体系之间的疲劳水平差异显著,反映了相结构与变形机制对疲劳抗力的决定性影响。

2.1 疲劳性能总体水平

2.1.1 $S-N$ 曲线

图5汇总了目前公开报道的LAM制造HEAs在应力比 $R=0.1$ 条件下的 $S-N$ 曲线。目前LAM制造HEAs的疲劳研究数量仍然有限,主要集中在经典的FCC成熟体系,包括单相CoCrNi^[75]、CoCrFeNi^[10,76-77]、CoCr-FeMnNi^[9]以及析出强化型 $(\text{CoCrNi})_{94}\text{Al}_3\text{Ti}_3$ ^[22,75]和 $(\text{FeCoNi})_{86}\text{Al}_7\text{Ti}_7$ ^[17]等合金。亚稳态HEAs(如 $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cr}_{15}\text{Si}_5$ ^[14])的疲劳研究也有报道。而难熔HEAs(如MoNbTaW等BCC体系)由于粉末成本高昂、成

型过程中裂纹倾向严重、致密度难以控制等原因,至今尚无系统的疲劳性能研究。这也反映了LAM制造HEAs疲劳研究整体仍处于起步阶段。

LAM制造HEAs的 $S-N$ 曲线呈现显著的离散性特征,这是区别于传统锻造材料最突出的疲劳数据表现。以SLM制备的CoCrFeMnNi合金为例,其 $S-N$ 曲线在双对数坐标下至约600 MPa呈线性关系,可表示为 $\log_{10}\sigma_{\max}=3.09-0.053\log_{10}N_f$,但在更高应力水平下出现了两组明显不同的疲劳寿命趋势,形成“双轨”行为^[9]。SLM制备的 $(\text{FeCoNi})_{86}\text{Al}_7\text{Ti}_7$ 合金经退火处理后,当应力范围低于700 MPa时,疲劳数据点呈现高度分散,分散程度可达2个数量级^[17]。 $(\text{CoCrNi})_{94}\text{Al}_3\text{Ti}_3$ 中熵合金在不同工艺批次间的疲劳寿命散布更为突出。在400~600 MPa的应力水平下,疲劳寿命从 10^4 到 10^6 周次不等,差异高达2个数量级,且出现了反直觉现象,部分高载荷试样的疲劳寿命反而等于甚至长于低载荷试样^[75]。因此,即使采用完全相同的合金成分,不同研究者利用相同工艺制备的相同材料之间疲劳性能差异也十分显著。造成数据显著离散的根本为LAM制造HEAs的成型过程和后处理工艺涉及的影响因素过多,包括但不限于激光功率、扫描速度和扫描策略等工艺参数的差异,粉末粒径分布和成分波动,致密度水平,热处理温度和时间,以及表面加工状态等。这些因素的耦合作用使得不同研究之间的疲劳数据难以直接比较,也给建立统一的疲劳性能评价体系带来了挑战。

2.1.2 不同HEAs体系疲劳性能对比与缺陷控制

从 $S-N$ 曲线汇总可以看出,不同HEAs体系因成分设计、相结构和强化机制的差异,表现出截然不同的疲劳性能水平。其中,析出强化型LAM制造HEAs表现出目前已发现的最高疲劳强度。 $(\text{FeCoNi})_{86}\text{Al}_7\text{Ti}_7$ 合金经780℃退火后疲劳极限从500 MPa提升至650 MPa,其最大疲劳应力可达722 MPa。这一优异性能归功于多重因素的协同作用,良好的致密度(99.86%)、球形度高(0.99)的孔隙形态、双纳米析出相(L_{12} 和 L_{21})强化带来的高屈服强度(1 169 MPa)和抗拉强度(1 471 MPa),其中析出相体积百分比高达约65%,以及纳米析出颗粒对滑移带的有效阻碍导致的曲折疲劳裂纹扩展路径,裂纹扩展速率仅为直线裂纹的0.6倍^[17](图6)。其疲劳比($\sigma_{\text{af}}/\sigma_{\text{UTS}}=0.44$)也优于Inconel 718、316L不锈钢和Ti-6Al-4V等常见增材制造合金。Al-Cr-Fe-Ni-V HEA虽然疲劳极限绝对值(300 MPa)较低,但其在打印态便可获得B2和 L_{12} 双析出相,无需后处理可实现较高的疲劳比(~ 0.3),B2相和 L_{12} 相分别贡献212.9和123.6 MPa

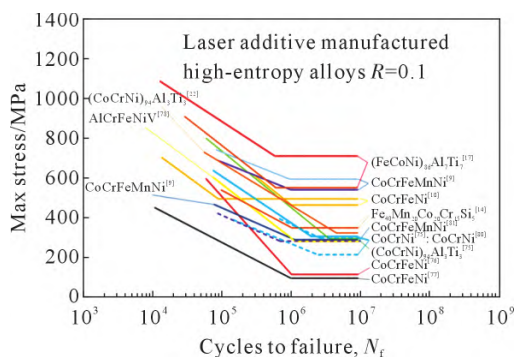


图5 LAM制造HEAs $S-N$ 曲线。其中虚线为对比铸造态试样
Fig.5 $S-N$ curves of the LAM HEAs, where the dashed line represents the cast counterparts

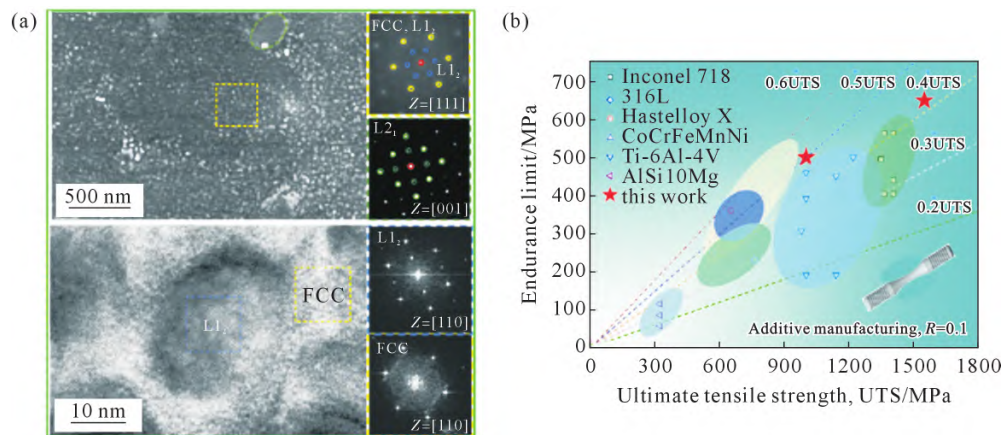


图6 析出强化型 SLM (FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ HEAs 组织和疲劳性能:(a) 双纳米析出相;(b) 归一化疲劳强度(应力范围 vs. 抗拉强度图)^[17]

Fig.6 Microstructure and fatigue properties of the precipitation-strengthened SLM (FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ HEAs: (a) dual nanoscale precipitates; (b) normalized fatigue strength (stress range vs. ultimate tensile strength)^[17]

的强化增量^[78]。

单相 FCC 结构 HEAs 的疲劳强度相对较低但变化范围较大。L-PBF 制备的 CoCrFeNi 合金疲劳极限在 150~494 MPa 之间波动, 取决于工艺参数和后处理状态(图 7)。Chen 等^[76]报道的疲劳强度为 170 MPa, Huang 等^[77]的结果约为 150 MPa, Kuzminova 等^[10]的结果为 414 MPa(未退火机加工)和 494 MPa(退火机加工)。这种体系内部的性能差异再次印证了工艺控制对单相 FCC 结构 HEAs 疲劳性能的决定性影响。

亚稳态 HEAs 的疲劳性能研究表明其在缺陷容忍性方面表现突出。Fe₄₀Mn₂₀Co₂₀Cr₁₅Si₅ 在含缺陷的打印态下即展现出 325 MPa 的疲劳极限($R=-1$, 换算至 $R=0.1$ 约为 450 MPa), 归一化疲劳强度 $\sigma_a/\sigma_y \approx 0.65$, 远高于多数增材制造合金。概率疲劳模型分析表明, 其裂纹萌生比能 $W_s=0.7 \times 10^8 \text{ J/m}^2$ 比增材制造铝合金高两个数量级, 而损伤敏感因子 $\mu=5.5 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$ 极低, 定量印证了该材料优异的缺陷容忍性。优异的缺陷容忍性要归因于 TRIP 和 TWIP 效应在孔隙附近产生的应力集中会诱发 $\gamma \rightarrow \varepsilon$ 相变和孪晶, 相变

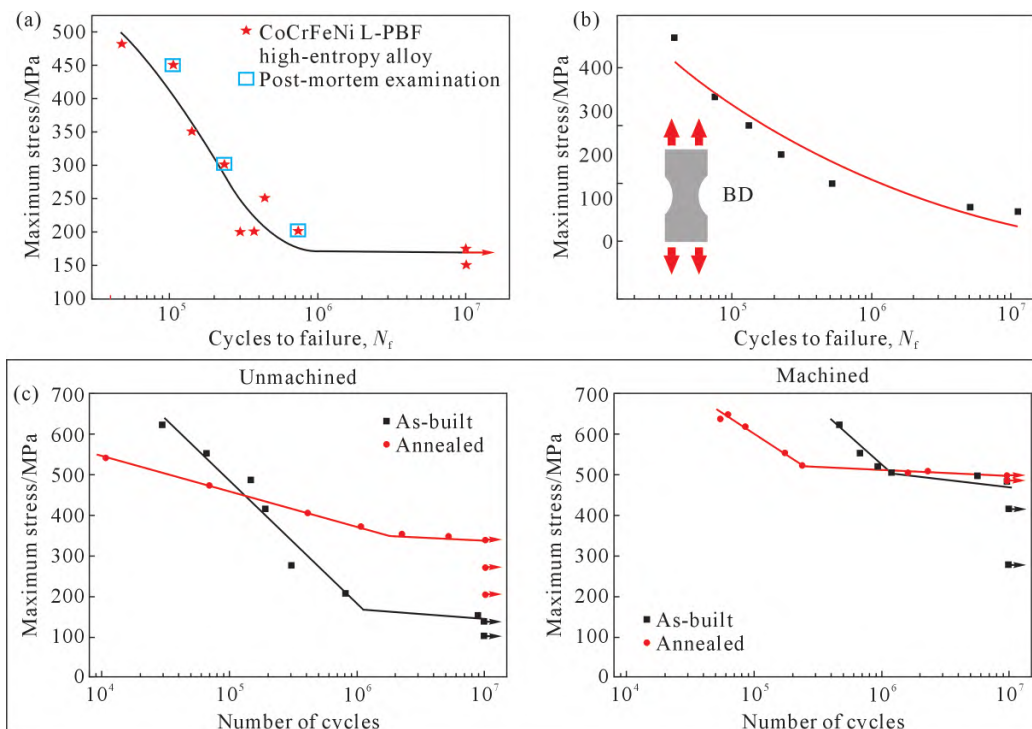


图7 LAM CoCrFeNi HEAs 的 $S-N$ 曲线, 其疲劳极限在 150~494 MPa 之间波动:(a) 疲劳强度为 170 MPa;(b) 疲劳强度约为 150 MPa;(c) 不同热处理条件和试样表面机加工状态下的 $S-N$ 曲线^[10,76-77]

Fig.7 $S-N$ curves of the LAM CoCrFeNi HEAs, which exhibit fatigue strengths ranging from 150 to 494 MPa: (a) fatigue strength was reported to be 170 MPa; (b) fatigue strength was reported to be ~150 MPa; (c) variations in heat treatment conditions and surface machining states led to significantly different $S-N$ responses^[10,76-77]

过程消耗局部能量并缓解应力集中,从而在裂纹尖端产生额外的塑性耗能并提高裂纹扩展阻力,进而延缓失效^[14]。

单相 FCC 结构 HEAs 的屈服/抗拉强度和疲劳强度相对较低,通过原位氧化物强化的 FCC 结构 HEAs 却展现出优异的疲劳性能。SLM 制备的 CoCrFeMnNi 合金通过控制粉末氧含量($4.19 \times 10^{-2}\%$)实现原位 Mn_2O_3 纳米氧化物的形成,疲劳极限达到约 570 MPa,约为均匀化铸态合金(280 MPa)的 2 倍^[9](图 8)。其 Orowan 强化贡献高达 536.7 MPa,配合位错密度强化(220 MPa)和 Hall-Petch 强化(154 MPa),使屈服强度从铸态的 293 MPa 提升至 774.8 MPa。

尽管缺陷对疲劳性能具有决定性影响,但部分 LAM 制造 HEAs 的疲劳性能已经略优于铸态对应材料。如图 5 中虚线所示,SLM 制备的 CoCrFeMnNi 合金(原位氧化物强化)疲劳极限(570 MPa)已远超铸态均匀化合金(280 MPa)^[9]。这得益于良好的成型策略实现的高致密度、细化的分层微观结构和原位析出强化的综合效应。CoCrFeNi 合金在机加工退火态的疲劳比(0.35)也与铸态同类合金相当或略优^[10]。(CoCrNi)₉₄Al₃Ti₃ 中合金在 LPBF 和 DED 两种工艺下均展现出优越的疲劳性能,LPBF 工艺因更高的冷却速率和更细的微观结构通常优于 DED 工艺^[75]。这些结果表明,在缺陷控制良好的条件下,LAM 的独特微观结构可以赋予 HEAs 超越传统制造工艺的

疲劳性能。

2.2 疲劳裂纹萌生与扩展行为

疲劳裂纹萌生与扩展行为是决定 LAM 制造 HEAs 疲劳寿命的关键环节。不同于传统制造材料主要由位错滑移带控制的萌生机制,LAM 制造 HEAs 因其独特的跨尺度不均匀组织和固有缺陷分布,呈现出从缺陷主导向组织主导的萌生机制转变特征。

2.2.1 疲劳裂纹萌生机制

LAM 制造 HEAs 的疲劳裂纹萌生机制可分为缺陷主导和组织主导萌生两大类。随着制造质量的提升和缺陷控制水平的改善,萌生机制逐渐从宏观缺陷控制向微观组织控制转变。

在当前的 LAM 质量水平下,缺陷主导疲劳裂纹的萌生仍是主流机制。SLM 制备的 CoCrFeMnNi HEAs 研究表明,含缺陷试样的疲劳寿命比无缺陷试样低约 20 倍(在相似应力水平下, N_f 分别为 115 788 和 2 044 859 周次),充分说明了缺陷对疲劳萌生的决定性影响^[9]。缺陷主导的裂纹萌生主要包括孔隙缺陷萌生、LOF 缺陷萌生和表面缺陷萌生等。其中,孔隙缺陷萌生是最常见的萌生模式。Chen 等^[76]对 L-PBF 制备的 CoCrFeNi HEAs 断口分析发现,疲劳裂纹主要起源于近表面的微孔隙(距表面 <200 μm),这些孔隙通过应力集中效应降低了疲劳裂纹萌生阻力(图 9a)。统计分析显示,直径 >30 μm 的孔隙几乎必然导致疲劳失效,而直径 <10 μm 的孔隙影响相对

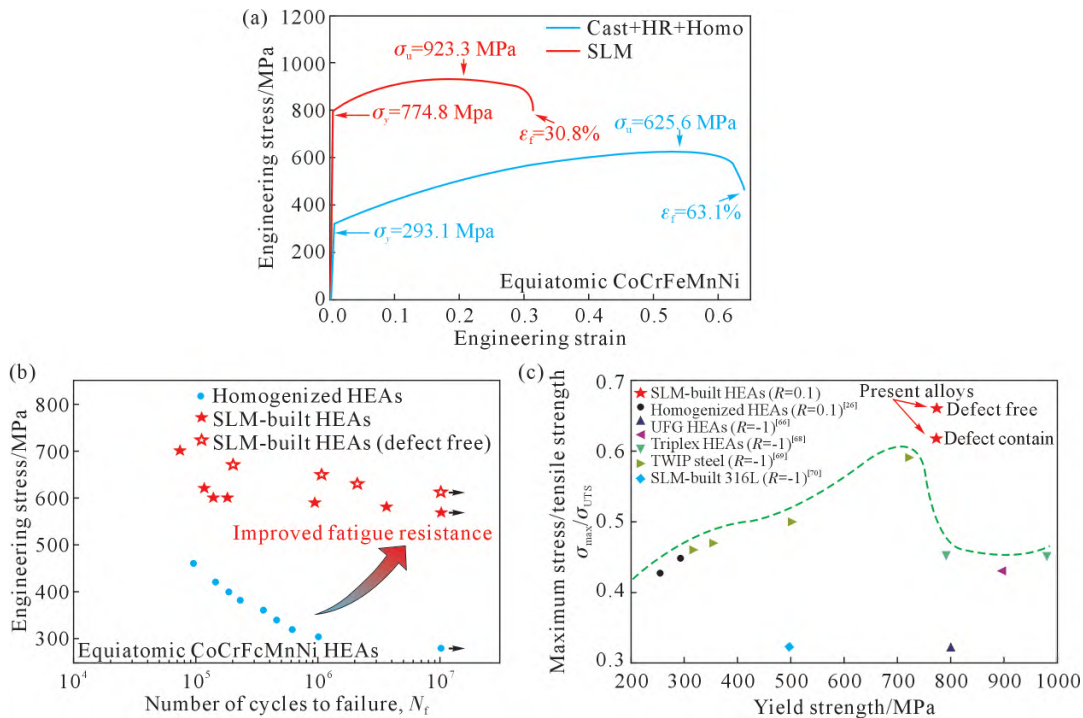


图 8 SLM 制备的 CoCrFeMnNi HEAs 的疲劳性能:(a) 应力应变曲线;(b) S-N 曲线;(c) 与其他合金的最大应力/拉伸强度 vs. 屈服强度图^[9]

Fig.8 Fatigue properties of the CoCrFeMnNi HEAs: (a) stress-strain curves; (b) S-N curves; (c) maximum stress/ultimate tensile strength vs. yield strength^[9]

较小。孔隙的危害程度不仅取决于尺寸,还与其形状和位置密切相关。球形孔隙的危害小于不规则孔隙,内部孔隙的危害小于表面孔隙。LOF 缺陷萌生具有更高的危害性。Du 等^[75]通过机器学习分析中熵合金疲劳数据发现,LOF 缺陷因其不规则形状和尖锐边缘产生更严重的应力集中,成为优先的裂纹萌生位点。与球形气孔不同,LOF 缺陷内部可能包含各种氧化物、纳米晶金属层以及周围金属中的位错结构,这些微观结构特征进一步恶化了其疲劳萌生特性。

表面缺陷萌生是激光增材制造 HEAs 疲劳失效的又一主要原因。AlCrFeNiV HEAs 研究表明,疲劳裂纹主要从距表面 200 μm 范围内的 LOF 缺陷萌生,表面和近表面缺陷因承受最大弯曲应力而成为最危险的萌生源^[78](图 9b)。表面粗糙、未熔颗粒、层间结合不良等表面特征都可能成为疲劳裂纹的优先萌生位点。此外,在 LAM CoCrFeNi 高熵合金中也观察到类似规律,未经机加工的试样疲劳裂纹多起源于表面缺陷,而经机加工去除表面缺陷后疲劳强度显著提高,进一步表明表面缺陷是控制其疲劳寿命的关键因素^[10]。

在高质量、低缺陷的 LAM 制造 HEAs 中,组织主导萌生机制逐渐显现,主要表现为驻留滑移带(PSB)诱导萌生和析出相界面萌生的疲劳裂纹萌生行为。PSB 诱导的微裂纹萌生是传统合金疲劳失效的典型机制(图 10a),但在 LAM 制造 HEAs 中引入析出相

后可显著调控 PSB 的演化行为。在 SLM(FeCoNi)₈₆-Al₇Ti₇ HEAs 中, L_{12} 与 L_{21} 双析出相对位错运动产生协同阻碍作用,其中 L_{21} 析出相对滑移带扩展具有更强的阻碍效应,使原本易于发展的集中大滑移带被分割为多个弥散分布的细小滑移带,从而有效降低局部应变集中并促进应力分散,最终抑制疲劳裂纹的萌生并提高疲劳性能(图 10b)。

在 LAM 制造 HEAs 中,晶粒尺度的变形不均匀性同样可以主导裂纹萌生。在循环加载过程中,柱状晶粒内部会发生显著的晶粒旋转和晶格旋转,同时伴随形变孪晶的激活。这些机制的协同作用使原有柱状晶发生取向分化与内部细化,形成明显的高应变区与低应变区分布,并在晶粒内部产生弱界面。当局部应变累积超过临界值时,裂纹可在晶粒内部优先萌生并扩展,表现出典型的晶内裂纹萌生特征。CoCrFeMnNi HEAs 低周疲劳研究中发现晶粒取向偏转可达到约 30°,并导致原始晶粒被划分为多个取向不同的亚区域,从而显著增强了局部应变不协调性并促进裂纹萌生^[15]。

析出相界面诱导的裂纹萌生在析出强化 HEAs 的疲劳性能研究中较为常见。(FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ HEAs 研究发现,疲劳裂纹可能从 L_{21} 析出相界面萌生,特别是在应变不相容引起的界面应力集中区域。不过,纳米尺度的共格 L_{12} 析出相因其与基体的良好相容性,反而有助于阻碍裂纹萌生和扩展^[17]。析出相不仅

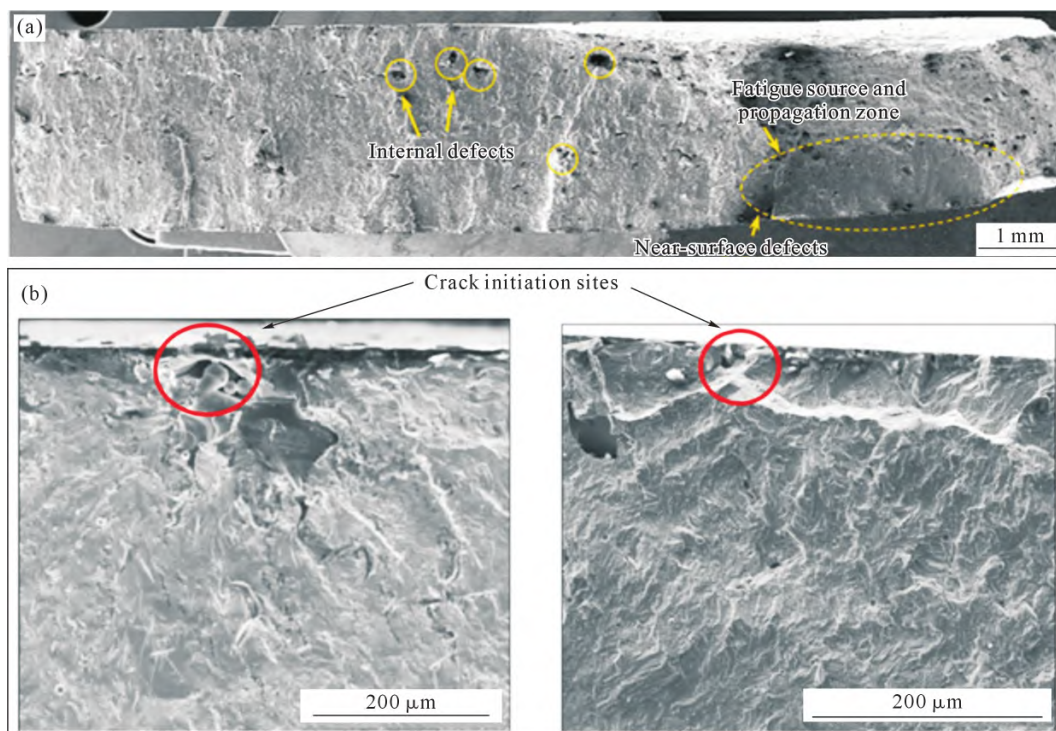


图 9 表面及亚表面缺陷诱导的裂纹萌生:(a) LAM 制造 HEAs 中的次表面球形气孔缺陷;(b) LOF 缺陷诱导的疲劳裂纹萌生^[76,78]
Fig.9 Crack initiation induced by surface and subsurface defects: (a) subsurface spherical pore defects in LAM HEAs; (b) fatigue crack initiation induced by LOF defects^[76,78]

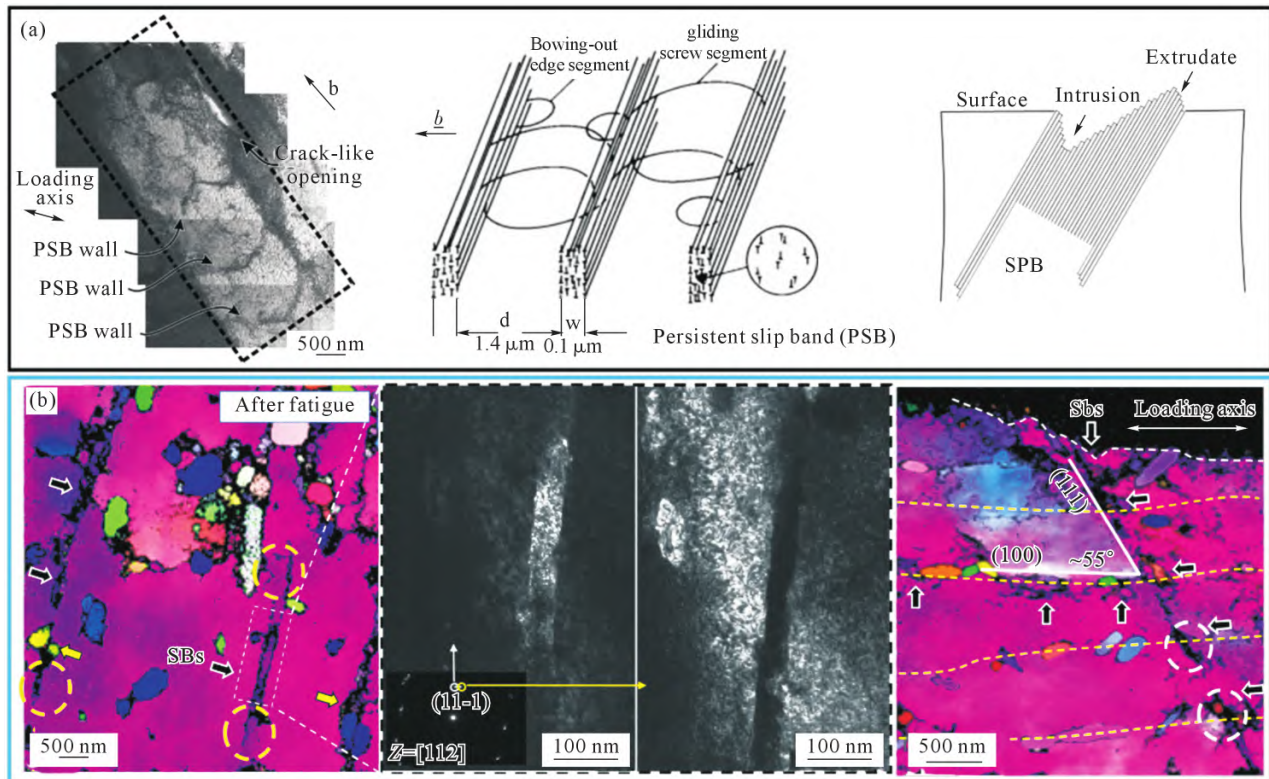


图 10 PSB 诱导的裂纹萌生:(a) 单晶 Ni 高周疲劳损伤后观察的驻留滑移带、驻留滑移带模型以及驻留滑移带引发的表面侵入和侵入;(b) SLM 制备 $(\text{FeCoNi})_{86}\text{Al}_7\text{Ti}_7$ HEAs 中 L_{21} 析出相对 PSB 的阻碍和分割^[17,79]

Fig.10 Crack initiation induced by PSB: (a) PSB observed after high-cycle fatigue damage in single-crystal Ni, a schematic model of PSBs, and surface intrusions and extrusions induced by PSBs; (b) obstruction and partitioning of PSBs by L_{21} precipitates in the SLM-fabricated $(\text{FeCoNi})_{86}\text{Al}_7\text{Ti}_7$ HEAs^[17,79]

影响裂纹萌生位置,还显著改变循环变形过程中的位错演化行为。 AlCrFeNiV HEAs 中, B_2 与 L_{12} 等多析出相在循环加载过程中对位错运动产生强烈钉扎作用,促使位错在局部区域发生累积与重排,逐渐形成稳定的位错胞结构及亚晶组织。该过程一方面提高了循环变形的均匀性,降低了局部应变集中程度,另一方面通过位错胞壁对滑移的阻碍作用延缓了持续滑移带的形成,从而显著推迟疲劳裂纹的萌生。此外,析出相与位错胞结构之间的相互作用还促进了胞结构向亚晶结构的转变,使材料在循环过程中持续发生动态组织演化,这种多尺度结构协同效应被认为是析出强化型 HEAs 获得优异疲劳抗力的重要原因之一^[78]。

总体而言,LAM 制造 HEAs 疲劳裂纹萌生机制的复杂性反映了其独特的多尺度微观结构特征。深入理解萌生机制及其转变规律,对于通过成分设计、工艺优化和后处理改善疲劳性能具有重要指导意义。

2.2.2 疲劳裂纹扩展行为

LAM 制造 HEAs 的疲劳裂纹扩展行为由其独特的跨尺度不均匀结构所主导,呈现出与传统制造合金既有共性又有显著差异的特征。其中,胞状亚结构和柱状晶组织对裂纹扩展路径的影响是 LAM 制造

HEAs 最具特色的扩展行为之一。Bajaj 等对激光束粉末床熔融(powder bed fusion-laser beam, PBF-LB)制备的 CoCrFeMnNi HEAs 的研究表明,裂纹萌生后倾向沿胞壁扩展,并在传播过程中不断受到胞结构的约束,使路径更加曲折。同时,循环加载激活的晶粒旋转与形变孪晶在裂纹尖端形成复杂塑性区,促使裂纹尖端发生钝化并降低局部应力集中,从而整体上减缓裂纹扩展过程并提升疲劳抗力^[15]。此外,从柱状晶组织尺度上观察,裂纹在扩展过程中会受到这些取向变化的影响,在熔池边界附近发生偏折,尤其是在柱状晶与等轴晶交界区域。由于局部应变不协调与取向突变,既可能诱导裂纹路径改变,也可能形成有利于裂纹继续扩展的通道,从而使裂纹路径呈现出明显的弯曲与不稳定传播特征(图 11)。

析出相对裂纹扩展的影响在析出强化型 HEAs 中表现尤为突出。在 $(\text{FeCoNi})_{86}\text{Al}_7\text{Ti}_7$ HEAs 的研究中,原位 TEM 观察裂纹扩展过程,发现裂纹首先沿滑移带 I 稳定扩展,当遭遇 L_{21} 析出相阻挡后,裂纹路径发生约 110° 的偏折,转而沿另一组 $\{111\}$ 面继续延伸。 L_{21} 析出相通过这种强制偏折机制使裂纹扩展轨迹呈现锯齿状,使裂纹扩展速率降低约 40% (图 12)。纳米尺度的 L_{12} 相与基体完全共格,主要

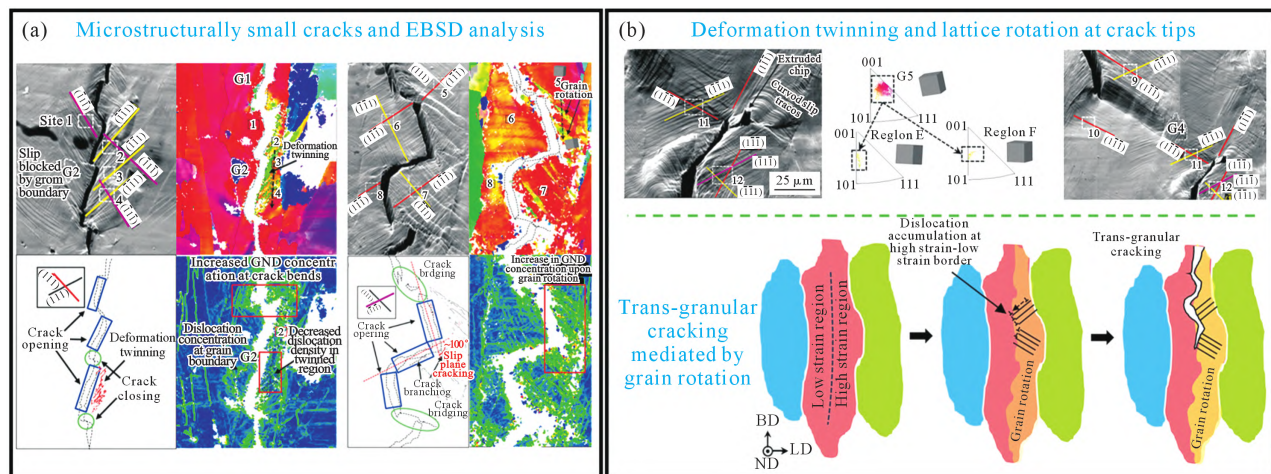


图 11 CoCrFeMnNi HEAs 裂纹扩展机制:(a) PBF-LB 制备的 CoCrFeMnNi HEAs 疲劳裂纹扩展轨迹和 EBSD 分析;(b) 裂纹尖端变形孪晶和晶格旋转图 and 机制示意图^[15]

Fig.11 CoCrFeMnNi HEAs crack propagation mechanism: (a) fatigue crack propagation path and EBSD analysis of the PBF-LB-fabricated CoCrFeMnNi HEAs; (b) deformation twinning and lattice rotation at the crack tip, together with a schematic illustration of the corresponding mechanism^[15]

发挥剪切强化作用,通过阻碍位错在滑移带上的集中运动来抑制滑移带的进一步发展,从而协同推迟裂纹扩展^[17]。此外,对 LPBF 制备的 Al-Cr-Fe-Ni-V HEA 的研究同样表明,B2 和 L1₂ 双析出相对裂纹扩展路径具有明显钉扎和偏转作用,裂纹穿过析出相弥散区时路径显著曲折,位错胞结构与析出相的协同作用进一步提高了裂纹扩展阻力^[78]。

3 后处理技术对疲劳性能的改善

通过合理的后处理技术,可以有效控制微观结构、消除缺陷、释放残余应力,进而显著提升疲劳抗力。尽管针对 HEAs 疲劳性能改善的研究相对较少,但可以借鉴传统合金的经验进行转化研究。

热处理是最常用的后处理技术。Xu 等^[17]对 (FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ 高熵合金的研究表明,780 °C 退火处理导致 L1₂ 和 L2₁ 析出相大幅析出,使疲劳极限从 500 MPa 提升至 650 MPa,增幅达 30%。该过程中,共格 L1₂ 析出相(~30 nm)通过抑制位错滑移带运动、阻碍裂纹扩展;而不共格的 L2₁ 析出相(~200 nm)则通过 Orowan 绕过机制和应变不相容导致的应力集中产生双重效应。

表面加工处理能够通过消除近表面缺陷显著改善疲劳性能。机加工处理通过去除表层含有孔隙、熔合不良和表面粗糙等缺陷的材料,将 CoCrFeNi 合金的疲劳强度从 138 MPa(未加工状态)提升至 414 MPa(加工后),增幅高达 2~3 倍^[10]。

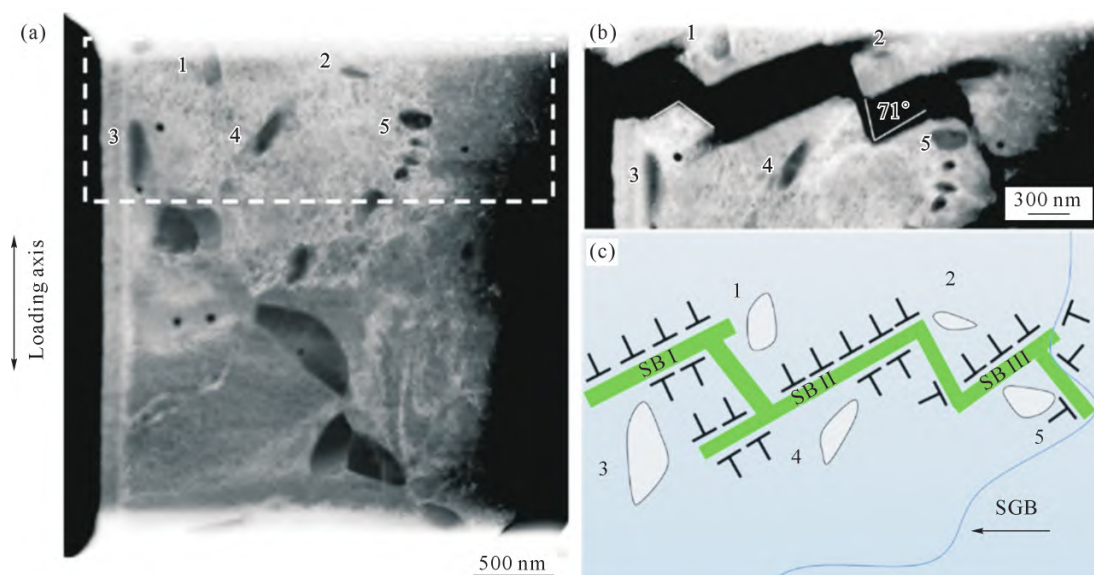


图 12 LAM 制造 (FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ HEAs 裂纹扩展机制:(a, b) 原位 TEM 拉-拉试验前和后扫描透射电子显微镜;(c) 析出相阻碍而形成的锯齿状滑移路径^[17]

Fig.12 Crack propagation mechanism of (FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ HEAs fabricated by LAM: (a, b) scanning transmission electron microscopy (STEM) images of the LAM-fabricated (FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ HEAs before and after the in situ TEM tension-tension test; (c) serrated slip paths formed because of the obstruction of precipitates^[17]

超声表面滚压(USRP)是一种新兴表面强化技术,通过叠加超声振动的滚压力在材料近表层引入显著塑性变形,从而形成梯度纳米结构。Chen等^[49]对L-PBF制备的CoCrNi中熵合金进行USRP处理后,在约300 μm范围内构建了由纳米孪晶与位错网络组成的梯度结构,使屈服强度由695.6 MPa提高至887.7 MPa(提升28%),并将10⁷周次疲劳极限由350 MPa提升至480 MPa(提升37%)。疲劳性能提升主要源于两方面机制:①梯度结构降低表面粗糙度并缓解缺陷应力集中,使裂纹萌生由表面转移至次表层(约540 μm),从而延缓萌生;②梯度层与基体间的力学差异诱导几何必要位错累积,产生HDI硬化效应,在高应力幅(如660 MPa)下通过背应力抑制局部循环塑性变形。此外,纳米孪晶在循环过程中表现出较高稳定性,未见显著粗化,有助于疲劳性能的持续提升。

热等静压(HIP)处理在钛合金中被证实可有效提升材料疲劳性能,可被借鉴用来提升LAM制造HEAs疲劳性能的后续研究^[74]。通过合理结合热处理、表面处理和表面强化等技术,有望将疲劳性能改善至与传统制造合金相当甚至更优的水平。

4 总结与展望

4.1 总结

(1)LAM制造HEAs的疲劳行为是工艺热历史、跨尺度组织特征与成形缺陷共同作用的结果。快速凝固和多道多层热循环使材料形成熔池边界、柱状晶/等轴晶、晶体学织构、位错胞结构、元素偏析及纳米析出相等多尺度组织特征,这些组织可通过细晶强化、位错强化和析出强化提高基体强度,但也会引起局部力学响应不均匀。与此同时,孔隙、未熔合缺陷、微裂纹以及表面粗糙峰等几何不连续区域会造成应力集中,成为疲劳裂纹萌生的重要诱因。因此,LAM制造HEAs的疲劳失效不能简单归因于单一缺陷或单一组织因素,而应从工艺—组织—缺陷—疲劳损伤耦合关系进行理解。

(2)LAM制造HEAs的疲劳失效机制具有由缺陷主导向组织调控转变的特征。在未进行有效缺陷控制时,疲劳寿命主要受孔隙、未熔合缺陷和表面状态控制,S-N曲线通常表现出较大离散性;当通过工艺优化、机加工、热等静压或合理热处理降低表面粗糙度、闭合内部孔隙并缓解残余应力后,缺陷对疲劳裂纹萌生的主导作用减弱,晶粒取向、位错胞结构、析出相界面、孪晶和相变等显微组织因素对裂纹萌生位置、裂纹扩展路径和扩展速率的影响更加突出。

需要指出的是,机加工和热等静压并不能消除材料本身的组织非均匀性和各向异性,但可削弱外在缺陷对疲劳性能的限制,使快速凝固形成的细晶、位错网络、过饱和固溶和析出强化等本征组织优势得以体现,从而使部分LAM制造HEAs的疲劳性能接近甚至超过传统制造材料。

(3)不同LAM制造HEAs体系间性能差异显著,析出强化型HEAs呈现出目前最高的疲劳性能水平。单相FCC结构HEAs疲劳性能虽然绝对值较低(150~494 MPa),但通过原位氧化物强化或缺陷容忍性设计(如亚稳态HEAs),也展现出优异的疲劳性能。而SLM(FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇经780 °C退火后最大疲劳应力约722 MPa,其优异疲劳性能源于L₁₂与L₂₁双析出相的协同强化。L₂₁相通过强制偏折机制使裂纹扩展速率降低约40%,而L₁₂相则通过剪切强化抑制滑移带发展。

4.2 展望

缺陷控制与组织调控是未来研究LAM制造HEAs疲劳性能的核心任务。面向服役可靠性,优异的疲劳性能应源于缺陷水平的显著降低与协同微观结构的有机统一。一方面,通过激光工艺参数优化、粉末质量控制与在线监测技术,实现缺陷尺寸与数量的有效控制。另一方面,围绕位错胞、析出相与孪晶等关键组织单元,进一步揭示其协同强化与裂纹萌生、扩展抑制机制,探索通过微结构设计来提升材料的缺陷容忍性与本征疲劳强度。同时,应积极推进针对激光增材制造特征的疲劳性能预测模型与评估体系构建,形成从工艺—缺陷—微观结构—疲劳响应的预测模型。在此基础上,应针对HEAs优异的综合性能,持续扩展应用驱动的工程化转化与示范应用,建立典型部件级验证路径,并以工程化服役需求反向牵引基础研究。

参考文献:

- [1] 卢秉恒. 增材制造技术—现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.
LU B H. Additive manufacturing technology: Current status and future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19-23.
- [2] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(9): 1111-1126.
LIN X, HUANG W D. Laser additive manufacturing of high-performance metallic components [J]. Scientia Sinica Informations, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [3] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 刘亚雄, 张安峰, 连芩, 靳忠民, 卢秉恒. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129-35.
LI D C, HE J K, TIAN X Y, LIU Y X, ZHANG A F, LIAN Q, JIN

- Z M, LU B H. Additive manufacturing: Integrated manufacturing of macro- and microstructures[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 129-135.
- [4] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,张晗,席丽霞. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 32-55.
- GU D D, ZHANG H M, CHEN H Y, ZHANG H, XI L X. Laser additive manufacturing of high-performance metallic components for aerospace applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 32-55.
- [5] CANTOR B, CHANG I, KNIGHT P, VINCENT A J B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 375: 213-218.
- [6] YE H J W, CHEN S K, LIN S J, GAN J Y, CHIN T S, SHUN T T, TSAU C H, CHANG S Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(5): 299-303.
- [7] 王松宇,吴宜霞,何峰. 增材制造析出强化型高熵合金非均匀组织、析出行为及力学性能研究进展[J]. *铸造技术*, 2025, 46(8): 774-88.
- WANG S Y, WU Y S, HE F. Review of the heterogeneous microstructures, precipitation behavior and mechanical properties of additively manufactured precipitation-strengthened high-entropy alloys[J]. *Foundry Technology*, 2025, 46(8): 774-788.
- [8] LIU H, YU H, GUO C, CHEN X, ZHONG S, ZHOU L, OSMAN A, LU J. Review on fatigue of additive manufactured metallic alloys: Microstructure, performance, enhancement, and assessment methods[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(17): e2306570.
- [9] KIM Y K, BAEK M S, YANG S, LEE K A. In-situ formed oxide enables extraordinary high-cycle fatigue resistance in additively manufactured CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101832.
- [10] KUZMINOVA Y O, FIRSOV D G, DAGESYAN S A, KONEV S D, SERGEEV S N, ZHILYAEV A P, KAWASAKI M, AKHATOV I S, EVLASHIN S A. Fatigue behavior of additive manufactured CrFeCoNi medium-entropy alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 863: 158609.
- [11] XU L, JIA Y, WU S, MU Y, JIA Y, WANG G. Low cycle fatigue properties of refractory high-entropy HfNbTiZr alloy[J]. *Intermetallics*, 2023, 152: 107751.
- [12] FAN X J, QU R T, ZHANG Z F. Remarkably high fracture toughness of HfNbTaTiZr refractory high-entropy alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 123: 70-77.
- [13] XU L, CHEN H, JIA Y F, WANG D P, WU S W, JIA Y D, WANG G, GUO Z X, XU Y. Revealing effects of creep damage on high-temperature fatigue behavior for HfNbTiZr refractory high-entropy alloys: Experimental investigation and crystal-plasticity modelling[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 231: 134-150.
- [14] AGRAWAL P, HARIDAS R S, THAPLIYAL S, YADAV S, MISHRA R S, MCWILLIAMS B A, CHO K C. Metastable high entropy alloys: An excellent defect tolerant material for additive manufacturing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 826: 142005.
- [15] BAJAJ D, FENG A H, QU S J, LI D Y, CHEN D L. Deformation mechanisms of an additively manufactured high-entropy alloy under cyclic loading[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2026, 262: 24-39.
- [16] LI Z, CUI Y N, YAN W T, ZHANG D, FANG Y, CHEN Y J, YU Q, WANG G, OUYANG H, FAN C, GUO Q, XIONG D B, JIN S B, SHA G, GHONIEM N, ZHANG Z, WANG Y M. Enhanced strengthening and hardening via self-stabilized dislocation network in additively manufactured metals[J]. *Materials Today*, 2021, 50: 79-88.
- [17] XU L, JIA Y P, WANG Z H, WU S W, JIA Y F, GENG C, PENG J C, TAN X, WANG G. Dual precipitate simultaneous enhancement of tensile and fatigue strength in (FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ high-entropy alloy fabricated using selective laser melting[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 148: 90-104.
- [18] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, EMMELMANN C. Additive manufacturing of metals[J]. *Acta Materialia*, 2016, 117: 371-392.
- [19] MOGHADDAM A O, SHABUROVA N A, SAMODUROVA M N, ABDOLLAHZADEH A, TROFIMOV E A. Additive manufacturing of high entropy alloys: A practical review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 77: 131-162.
- [20] JAVIDRAD H, KOC B, BAYRAKTAR H, SIMSEK U, GUNAYDIN K. Fatigue performance of metal additive manufacturing: A comprehensive overview[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2024, 19(1): e2302556.
- [21] ABDULLAH M R, PENG Z. Review and perspective on additive manufacturing of refractory high entropy alloys[J]. *Materials Today Advances*, 2024, 22: 100497.
- [22] QIU J H, LU T W, YAO N, CHEN X Y, LI K S, SUN B H, CHEN Y F, ZHANG X C, TU S T. New insights into fatigue anisotropy of an additively manufactured medium-entropy alloy: From the perspectives of crack initiation and crack propagation[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2024, 19(1): e2411025.
- [23] MU Y K, HE L H, DENG S H, JIA Y F, JIA Y D, WANG G, ZHAI Q J, LIAW P K, LIU C T. A high-entropy alloy with dislocation-precipitate skeleton for ultrastrength and ductility[J]. *Acta Materialia*, 2022, 232: 117975.
- [24] KÜRNSTEINER P, WILMS M B, WEISHEIT A, GAULT B, JÄGLE E A, RAABE D. High-strength damascus steel by additive manufacturing[J]. *Nature*, 2020, 582(7813): 515-519.
- [25] GU D, SHI X, POPRAWA R, BOURELL D L, SETCHI R, ZHU J. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. *Science*, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [26] ZHU J, XU M M, CHENG Y X, WU S, MAO Y X, HUI X D, ZHENG H Y. Achieving strength-plasticity breakthrough of rare-earth free Mg alloy with multi-scale framework fabricated via laser-cold metal transfer hybrid additive manufacturing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2025, 343: 119002.
- [27] LIU C X, XIE L C, ZHANG L C, WANG L Q. Cellular structure mediated dislocation regulation in additively manufactured refractory high entropy alloy[J]. *Materials Research Letters*, 2024, 12(6): 425-432.
- [28] LI Z, ZHAO P C, LU T W, FENG K, TONG Y G, SUN B H, YAO N, XIE Y, HAN B L, ZHANG X C, TU S T. Effects of post annealing on the microstructure, precipitation behavior, and mechanical property of a (CoCrNi)₉₄Al₃Ti₃ medium-entropy alloy fabricated by

- laser powder bed fusion[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 135: 142-55.
- [29] KARLSSON D, MARSHAL A, JOHANSSON F, SCHUISKY M, SAHLBERG M, SCHNEIDER J M, JANSOON U. Elemental segregation in an AlCoCrFeNi high-entropy alloy-A comparison between selective laser melting and induction melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 784: 195-203.
- [30] HUANGFU B, LIU Y, LIU X, WU X, BAI H. Anisotropy of additively manufactured metallic materials[J]. *Materials*, 2024, 17(15): 3653.
- [31] MALEKI E, BAGHERIFARD S, BANDINI M, BANDINI M, GUAGLIANO M. Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 37: 101619.
- [32] PANWISAWAS C, TANG Y T, REED R C. Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2327.
- [33] ZHU X, JIANG F, GUO C, WANG Z, DONG T, LI H. Prediction of melt pool shape in additive manufacturing based on machine learning methods[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 108964.
- [34] WANG J, ZHU R, LIU Y, ZHANG L. Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single- and multi-track melt pools for process optimization[J]. *Advanced Powder Materials*, 2023, 2(4): 100137.
- [35] JI P C, WANG Z H, MU Y K, JIA Y D, WANG G. Microstructural evolution of $(\text{FeCoNi})_{85.84}\text{Al}_{7.07}\text{Ti}_{7.09}$ high-entropy alloy fabricated by an optimized selective laser melting process[J]. *Materials & Design*, 2022, 224: 111326.
- [36] LIANG J, XIE X C, MU Y K, YANG P, WU Z B, JIA Y D, WANG G. Metastable core-shell precipitation strengthened high-entropy alloys fabricated by direct energy deposition with multi-stage terrace-like slip wave toughening[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 210: 40-57.
- [37] WU Y W, ZHAO X Y, CHEN Q, YANG C, JIANG M G, LIU C Y, JIA Z, CHEN Z W, YANG T, LIU Z Y. Strengthening and fracture mechanisms of a precipitation hardening high-entropy alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, 17(3): 451-467.
- [38] LIU L X, PAN J, ZHANG C, XU J Y, GUO R, LIU L. Achieving high strength and ductility in a 3D-printed high entropy alloy by cooperative planar slipping and stacking fault[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 843: 143106.
- [39] SIAO Y H, WEN C D. Examination of molten pool with Marangoni flow and evaporation effect by simulation and experiment in selective laser melting[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 125: 105325.
- [40] CHIA H Y, ZHANG Y, WANG L, YAN W. Unveiling gas-liquid metal reactions in metal additive manufacturing: High-fidelity modeling validated with experiments[J]. *Acta Materialia*, 2024, 275: 120029.
- [41] SURYAWANSHI J, PRASHANTH K G, RAMAMURTY U. Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 696: 113-121.
- [42] SURYAWANSHI J, PRASHANTH K G, SCUDINO S, ECKERT J, PRAKASH O, RAMAMURTY U. Simultaneous enhancements of strength and toughness in an Al-12Si alloy synthesized using selective laser melting[J]. *Acta Materialia*, 2016, 115: 285-294.
- [43] ZHAO C, WANG Z, LI D X, KOLLO L, LUO Z Q, ZHANG W W, PRASHANTH K G. Selective laser melting of Cu-Ni-Sn: A comprehensive study on the microstructure, mechanical properties, and deformation behavior[J]. *International Journal of Plasticity*, 2021, 138: 102926.
- [44] WANG J, FU A, LIU B, CHEN Y X, CAO Y K, ZHOU H, WANG B F, LI X F, LI J, FANG Q H, LIU Y. Weakening the mechanical property anisotropy of additively manufactured medium entropy alloy by controlling the cellular structure[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 89: 104303.
- [45] WU S W, CHIA H Y, ZHANG T L, JIA Y F, MU Y K, ZHANG Q, LEK Y Z, HU D J, FAN L, YAN W T. A precipitation strengthened high entropy alloy with high (Al+Ti) content for laser powder bed fusion: Synergizing in intrinsic hot cracking resistance and ultra-high strength[J]. *Acta Materialia*, 2023, 258: 119193.
- [46] CUI L Q, DENG D Y, JIANG S, PENG R L, XIN T Z, ZHANG H H, HEGEDÜS Z, LIENERT U, HE W F, MOVERARE J. New insights into the anisotropic ductility of additively manufactured Inconel 718[J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 169: 103738.
- [47] BAI Y J, YANG C, LIU Z S, JIANG Q Y, WANG Y J, ZHANG K, LIU Y Z, LI Y D, WEI B C. Mechanical anisotropy in additively manufactured laminated high-entropy alloys: The role of interface geometry[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 210: 72-85.
- [48] CHEN H X, LANG L Z, SHANG X, DASH S S, HE Y X, KING G, ZOU Y. Anisotropic co-deformation behavior of nanolamellar structures in additively manufactured eutectic high entropy alloys[J]. *Acta Materialia*, 2024, 271: 119885.
- [49] CHEN X Y, LU T W, YAO N, CHEN H Y, SUN B H, XIE Y, CHEN Y F, WAN B B, ZHANG X C, TU S T. Enhanced fatigue resistance and fatigue-induced substructures in an additively manufactured CoCrNi medium-entropy alloy treated by ultrasonic surface rolling process[J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 169: 103721.
- [50] LIU L F, DING Q Q, ZHONG Y, ZOU J, WU J, CHIU Y L, LI J X, ZHANG Z, YU Q, SHEN Z J. Dislocation network in additive manufactured steel breaks strength-ductility trade-off[J]. *Materials Today*, 2018, 21(4): 354-361.
- [51] GAO L, CHEN Y, ZHANG X, AGNEW S R, CHUANG A C, SUN T. Evolution of dislocations during the rapid solidification in additive manufacturing[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 4696.
- [52] BRENNAN M C, KEIST J S, PALMER T A. Defects in metal additive manufacturing processes[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(7): 4808-4818.
- [53] ABIODUN KAREEM S, FAVOR OLANREWAJU O, UCHENNA ANAELE J, IREOLUWA OGEDENGBE I, JOHN ERINLE T, AZEEZ OLAYIWOLA M, CHINO CHINEDU C, RANTI OKE S, OLUWATOSIN BODUNRIN M, MALEDI N. Additive manufacturing of high entropy alloys via selective laser melting: a nascent review on defects mitigation, microstructural evolution, mechani-

- cal and other functional properties[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2026, 142(5): 2051-2100.
- [54] MOJUMDER S, GAN Z, LI Y, AL AMIN A, LIU W K. Linking process parameters with lack-of-fusion porosity for laser powder bed fusion metal additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2023, 68: 103500.
- [55] HUANG Y, FLEMING T G, CLARK S J, MARUSSI S, FEZZAA K, THIYAGALINGAM J, LEUNG C L A, LEE P D. Keyhole fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1170.
- [56] BUSTILLOS J, KIM J, MORIDI A. Exploiting lack of fusion defects for microstructural engineering in additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 48: 102399.
- [57] WANG L, ZHANG Y M, CHIA H Y, YAN W T. Mechanism of keyhole pore formation in metal additive manufacturing [J]. npj Computational Materials, 2022, 8(1): 22.
- [58] LI Z, GUT A, BURDA I, MICHEL S, GWERDER D, SCHÜTZ P, ROMANCUK D, AFFOLTER C. Investigation of individual lack-of-fusion defects in the fatigue performance of laser-powder bed fusion Ti6Al4V alloys: A finite element analysis [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 134: 104735.
- [59] TANG W Q, LUO Z X, LI D Y, PENG Y H. Predicting fatigue failure induced by lack-of-fusion defects in additive manufacturing: A synergistic multiscale simulation-deep learning framework[J]. Additive Manufacturing, 2026, 115: 105047.
- [60] GOCKEL J, SHERIDAN L, KOERPER B, WHIP B. The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 124: 380-388.
- [61] WU C Y, LU M C, YANG W C, CHI N C. Experimental study of balling defect generation and audible sound analysis in directed energy deposition metal additive manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 134 (1-2): 205-221.
- [62] ZÖLLER C, ADAMS N A, ADAMI S. Numerical investigation of balling defects in laser-based powder bed fusion of metals with Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2023, 73: 103658.
- [63] FAN A Q, LUO H J, LIAO J F, DU Y L. Influence of zinc evaporation-driven spattering on defect formation and mechanical properties in laser powder bed fusion of AA7075 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026, 41: 2335-2348.
- [64] ZHANG Y M, WU S W, GUO Z X, PENG G C, WANG L, YAN W T. Defects caused by powder spattering and entrainment in laser powder bed fusion process: High-fidelity modeling of gas, melt pool and powder dynamics[J]. Acta Materialia, 2025, 288: 120816.
- [65] OSORIO N O, SANDOVAL-RODRIGUEZ C. Evaluation of 316L deposition parameters for the reducing stair-case effect of laminated parts by coaxial laser powder deposition[J]. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2025, 13(4): 1009-1022.
- [66] LY S, RUBENCHIK A M, KHAIRALLAH S A, GUSS G, MATTHEWS M J. Metal vapor micro-jet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 4085.
- [67] KUNTOČLU M, SALUR E, CANLI E, ASLAN A, GUPTA M K, WAQAR S, KROLCZYK G M, XU J. A state of the art on surface morphology of selective laser-melted metallic alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(3-4): 1103-1142.
- [68] DELRIO F W, KHAN R M, HEIDEN M J, KOTULA P G, RENNER P A, KARASZ E K, MELIA M A. Porosity, roughness, and passive film morphology influence the corrosion behavior of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 102: 654-662.
- [69] LIN T X, LI C Y, ZHOU H K, CHEN R, LI Y, CUI C, ZHANG L Z, LI M Y, WANG Z Z, XU W W. A review on cracking in laser additive manufacturing of nickel-based superalloys: Types, formation mechanisms, and suppression strategies[J]. Rare Metals, 2026, 45(4): e70180.
- [70] ZHOU Z P, HUANG L, SHANG Y J, LI Y P, JIANG L, LEI Q. Causes analysis on cracks in nickel-based single crystal superalloy fabricated by laser powder deposition additive manufacturing [J]. Materials & Design, 2018, 160: 1238-1249.
- [71] OZER S, DOĞU M N, OZDEMIREL C, BILGIN G M, GUNES M, DAVUT K, GU H, BRABAZON D. Effect of aging treatment on the microstructure, cracking type and crystallographic texture of IN939 fabricated by powder bed fusion-laser beam[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 574-588.
- [72] CHEN Y H, ZHANG D Y, O'TOOLE P, QIU D, SEIBOLD M, SCHRICKER K, BERGMANN J P, RACK A, EASTON M. In situ observation and reduction of hot-cracks in laser additive manufacturing[J]. Communications Materials, 2024, 5(1): 84.
- [73] MURAKAMI Y, MASUO H, TANAKA Y, NAKATANI M. Defect analysis for additively manufactured materials in fatigue from the viewpoint of quality control and statistics of extremes [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 19: 113-122.
- [74] QU Z, ZHANG Z J, LIU R, XU L, ZHANG Y N, LI X T, ZHAO Z K, DUAN Q Q, WANG S G, LI S J, MA Y J, SHAO X H, YANG R, ECKERT J, RITCHIE R O, ZHANG Z F. High fatigue resistance in a titanium alloy via near-void-free 3D printing[J]. Nature, 2024, 626(8001): 999-1004.
- [75] DU J H, YANG X F, ZHU T Y, LU T W, YAO N, CHEN Y F, LI K S, CHEN X Y, MA G S, SUN B H, ZHANG X C, TU S T. A universal high-cycle fatigue life prediction of additive manufacturing medium-entropy alloys via machine learning and nondestructive tests[J]. International Journal of Fatigue, 2026, 204: 109360.
- [76] CHEN Y N, LI B, CHEN B, XUAN F Z. High-cycle fatigue induced twinning in CoCrFeNi high-entropy alloy processed by laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2023, 61: 103319.
- [77] HUANG G Q, LI B, CHEN Y N, XUAN F Z. Nanotwining induced by tensile fatigue and dynamic impact of laser powder bed fusion additively manufactured CoCrFeNi high-entropy alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 183: 241-257.
- [78] LIU Z W, TAN Z, HE D Y, XUE Y F, SHAO W, ZHOU Z, YAO H H, CHEN L J, YANG Y, SHAO Y K, CUI L. High-cycle fatigue

- behaviors of Al-Cr-Fe-Ni-V high-entropy alloy prepared by laser powder bed fusion: Roles of dislocation cell substructure and multi-precipitates[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2026, 253: 25-38.
- [79] LAVENSTEIN S, GU Y J, MADISETTI D, EL-AWADY J A. The heterogeneity of persistent slip band nucleation and evolution in metals at the micrometer scale[J]. Science, 2020, 370 (6513): eabb2690.
- [80] SHUAI Q, JIANG Q, LIU F L, LI L, HE C, ZHANG H, WANG C, LIU Y J, CHEN Y, WEANF Q Y. Effect of heat treatment on the high cycle fatigue behavior of CoCrNi medium-entropy alloy[J]. International Journal of Structural Integrity, 2025, 16(6): 1374-1388.
- [81] KIM Y K, HAM G S, KIM H S, LEE K A. High-cycle fatigue and tensile deformation behaviors of coarse-grained equiatomic CoCr-FeMnNi high entropy alloy and unexpected hardening behavior during cyclic loading[J]. Intermetallics, 2019, 111: 10648

(责任编辑:李亚敏)