

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.6053

高能激光作用下高熵合金的制备改性及性能调控研究

蒯雯雯¹, 安旭龙¹, 孙文文², 汪鑫³

(1. 常州大学材料科学与工程学院, 江苏常州 213164; 2. 东南大学材料科学与工程学院, 江苏南京 211189; 3. 石河子众金电极箔有限公司, 新疆石河子 832061)

摘要: 高熵合金作为颠覆传统单主元合金设计范式的多主元新型材料, 依托高熵、迟滞扩散、晶格畸变及鸡尾酒四大核心效应, 展现出优异的力学性能、高温稳定性、耐蚀性与抗辐照性, 在极端服役环境下具备广阔应用前景。然而传统制备加工工艺易引发成分偏析、晶粒粗大、脆性相析出等缺陷, 严重制约其本征性能发挥与工程化应用。激光技术凭借高能量密度、超快热循环速率、窄热影响区及非接触精准加工等优势, 成为实现高熵合金高效制备、精细组织调控与高性能优化的核心技术路径。本文系统梳理高熵合金的结构特性与性能优势, 剖析传统制备技术的固有瓶颈; 重点阐述激光增材制造、激光表面改性、激光焊接 3 类核心激光技术在高熵合金领域的研究进展, 揭示不同激光工艺对高熵合金微观组织演化、缺陷形成与抑制及力学性能的调控规律; 深入探讨激光-高熵合金相互作用过程中的关键基础科学问题与技术挑战; 最后从理论、工艺、材料体系及工程应用等维度, 展望了激光技术在高熵合金领域的未来发展方向。

关键词: 高熵合金; 激光技术; 激光增材制造; 激光表面改性; 激光焊接

中图分类号: TG139

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)06-0623-17

Study on the Preparation Modification and Performance Regulation of High-entropy Alloys under High-energy Laser Irradiation

KUAI Wenwen¹, AN Xulong¹, SUN Wenwen², WANG Xin³

(1. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. Shihezi Joinchin Electrode Foil Co., Ltd., Shihezi 832061, China)

Abstract: As a new type of multi-principal element material that subverts the design paradigm of traditional single-principal element alloys, high-entropy alloys exhibit excellent mechanical properties, high-temperature stability, corrosion resistance and radiation resistance by virtue of four core effects: high entropy, sluggish diffusion, lattice distortion and cocktail effect, thus boasting broad application prospects in the field of extreme service environments. However, traditional preparation and processing technologies are prone to induce a series of problems, such as composition segregation, coarse grains and brittle phase precipitation, which severely restrict the use of their intrinsic properties and engineering applications. Owing to its unique advantages, including high energy density, ultrafast thermal cycle rate, narrow heat-affected zone and noncontact precision processing, laser technology has become a core technical approach for realizing the efficient preparation, fine microstructure regulation and high-performance optimization of high-entropy alloys. The structural characteristics and performance advantages of high-entropy alloys are systematically discussed, and the inherent bottlenecks of traditional preparation technologies are analysed. The research progress of three core laser technologies,

收稿日期: 2026-03-31

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(52301130); 国家自然科学基金面上项目(52371103); 高温轻合金及应用技术全国重点实验室开放基金(sysjj2025314); 石河子市重大科技专项(2024ZD02)

作者简介: 蒯雯雯, 2003 年生, 硕士生。研究方向为激光增材。Email: 2462071877@qq.com

通信作者: 孙文文, 1987 年生, 教授。研究方向为中锰先进高强度钢、高熵合金及铝合金等金属材料的基础与应用。

Email: swwcsu@live.cn

安旭龙, 1988 年生, 副教授。研究方向为先进金属结构材料、金属基复合材料及表面改性。Email: axl@cczu.edu.cn

引用格式: 蒯雯雯, 安旭龙, 孙文文, 汪鑫. 高能激光作用下高熵合金的制备改性及性能调控研究[J]. 铸造技术, 2026, 47(6): 623-639.
KUAI W W, AN X L, SUN W W, WANG X. Study on the preparation modification and performance regulation of high-entropy alloys under high-energy laser irradiation[J]. Foundry Technology, 2026, 47(6): 623-639.

namely, laser additive manufacturing, laser surface modification and laser welding, within the field of high-entropy alloys is emphasized, and the regulatory effects of different laser processes on the microstructural evolution, defect formation and inhibition, and mechanical properties of high-entropy alloys are revealed. Key basic scientific issues and technical challenges arising from the interaction between lasers and high-entropy alloys are further discussed. The future development trends of laser technologies applied to high-entropy alloys are ultimately predicted from the perspectives of theoretical research, manufacturing processes, material systems and industrial engineering applications.

Key words: high-entropy alloys; laser technology; laser additive manufacturing; laser surface modification; laser welding

极端服役环境对结构材料的强度、韧性、耐高温、抗腐蚀及抗辐照等综合性能提出了严苛要求,传统单主元合金已难以满足多元应用需求。高熵合金由 Yeh 等^[1]首次提出,打破了以一种或两种元素为主的传统合金设计思路,通过 5 种及以上等摩尔比或近等摩尔比金属元素的多元协同,形成高构型熵的固溶体相,展现出传统合金无法比拟的综合性能优势。目前高熵合金的传统制备方法以熔炼铸造法、粉末冶金法为主^[2],但此类工艺在晶粒细化、相结构精准调控、缺陷有效抑制等方面存在显著局限,成为制约高熵合金性能提升与应用拓展的关键因素。

近年来,激光技术凭借高能量密度、超快加热/冷却、非接触加工、时空精准可控等优势,在高熵合金块体制备、表面强化、精密连接等方向实现快速发展,成为突破传统工艺瓶颈的重要手段。激光加工可实现高熵合金成分均匀化、组织精细化与缺陷有效控制,为其高性能化制造提供了全新途径。本文系统综述激光技术在高熵合金领域的应用研究进展,对比传统制备工艺与激光加工的技术差异,阐明激光增材制造、激光表面改性、激光焊接的工艺原理与性能调控效果,剖析激光-高熵合金相互作用的核心科学问题,并对未来发展趋势进行展望,以期高熵合金的性能提升与工程化应用提供新的思路。

1 高熵合金的结构特征与性能优势

高熵合金是由 5 种及以上等摩尔比或近等摩尔比金属元素混合形成的多主元合金体系,多组元的协同作用使其产生四大核心效应,赋予其区别于传统合金的结构特征与优异性能,成为新一代先进结构材料的研究热点。四大核心效应是其结构与性能的本质支撑^[3]:①高熵效应,通过多组元混合,大幅提升合金体系的构型熵,在热力学方面抑制脆性金属间化合物与复杂析出相的形成,促使合金优先形成体心立方(BCC)或面心立方(FCC)简单固溶体相,保障了合金的相稳定性;②迟滞扩散效应,因多组元元素间的相互牵制,显著降低原子扩散速率,凝固过程中可有效抑制晶粒长大,同时提升合金的

耐腐蚀性与抗蠕变性;③晶格畸变效应,源于不同元素原子尺寸、电负性的固有差异,造成晶格的微观畸变,可有效阻碍位错运动,成为合金强化的重要机制;④鸡尾酒效应,通过多组元元素的性能互补与协同调控,实现高强度、高韧性、耐磨损、耐腐蚀等综合性能的同步提升,满足多元服役环境的性能需求。四大核心效应协同作用,使高熵合金形成了以简单固溶体相为主、晶格畸变普遍存在、原子扩散速率低的独特结构特征,为其优异性能的实现奠定了结构基础。

从组织结构角度来看,高熵合金最突出的特征在于以简单固溶体相为主要构成,常见为 FCC、BCC 或 FCC+BCC 双相结构,极少形成传统合金中复杂且脆性的金属间化合物。这一特征源于多主元混合带来的高构型熵效应,在热力学上稳定了简单固溶体结构,从根源保证了合金的结构稳定性与基本力学性能。FCC 结构通常表现为晶粒尺寸相对均匀、晶界迁移阻力适中,赋予合金优异的塑性、低温韧性与耐蚀性;BCC 结构则因晶格原子排布特性与显著的晶格畸变,表现出高强度、高硬度与良好的高温稳定性;而 FCC+BCC 双相结构可通过两相比比例、形貌与分布调控,实现强度与塑性的匹配,是工程化应用中最具潜力的组织结构形式。

依托独特的结构特征,高熵合金展现出传统合金难以企及的多元性能优势,适用于多种极端服役场景^[4]:①强韧化综合性能优异,可在保持超高强度的同时具备良好的塑性,满足高强度结构件的制备需求;②低温韧性突出,低温环境下强度与塑性同步提升,且断裂韧性极高,可应用于深冷等低温极端工况;③高温稳定性良好,兼具高相稳定性与低原子扩散系数,高温强度保持性优异,适用于高温结构部件;④耐磨性与耐腐蚀性卓越,超高硬度与加工硬化系数赋予其优异的耐磨性,多组元合金化元素可协同形成稳定钝化膜,适用于海洋等强腐蚀环境;⑤抗辐照性能优异,良好的热冲击抗性与晶格畸变特征,使其成为核能结构材料的潜在选择。

2 高熵合金传统制备技术瓶颈

目前高熵合金的传统制备技术以电弧熔炼法和

粉末冶金法为主,两类工艺虽体系成熟、成本相对较低,但受限于自身工艺特性,在应对多组元、高晶格畸变的高熵合金体系时,存在难以克服的技术瓶颈,严重制约了高熵合金本征性能的发挥。

2.1 电弧熔炼法

电弧熔炼是高熵合金制备的常用方法,虽具备较高的熔炼温度,可实现多组元金属的熔融混合,但存在显著的工艺缺陷:一是成分调控难度大,熔炼过程中易出现元素烧损,且单次熔炼量小,难以实现成分的精准控制与批量制备;二是组织调控能力弱,冷却速率较慢且易导致晶粒粗大,铸态合金存在明显的枝晶偏析,未改性合金硬度低、摩擦学性能差,易出现材料转移、塑性变形与片状脱落等;三是性能稳定性不足,受摩擦副类型、载荷等外界因素影响较大,且对陶瓷摩擦副的抗磨损性能较差,高载荷下易出现氧化磨损与材料剥落,难以满足高精度、高稳定性的应用需求^[9]。

柳建等^[9]采用真空电弧熔炼技术制备 FeCoNi-CrMnAl_{0.5} 高熵合金,可实现合金成分与组织基本均匀,元素改性后合金硬度和干摩擦磨损性能大幅提升,适配部分耐磨应用场景;但铸态合金晶粒粗大,未改性合金硬度低、摩擦因数高、磨损量大,易发生材料转移等,改性后对陶瓷摩擦副抗磨性仍差,高载荷下会氧化磨损,且摩擦学性能受摩擦副、载荷影响大,性能稳定性与适配性不足。Zhuo 等^[7]采用真空电弧熔炼法制备 Ti-Zr-V-Mo 系多相难熔高熵合金,经多次重熔保证成分均匀性,所得合金铸态下存在铸造缺陷与剪切失稳问题,力学性能与理想强度存在差距;合金元素偏析显著,冷却速率还会影响相转变与微观演化,慢冷易致枝晶偏析、塑性下降,需后续热处理来改善组织与性能,限制其直接工程应用。

2.2 粉末冶金法

粉末冶金法通过机械合金化制备高熵合金粉末,再经烧结成型获得块体合金,但其工艺过程存在难以规避的固有短板^[9]:一是成分均匀性差,机械合金化过程中,即便延长球磨时间,仍难以实现元素的完全均匀分布,易出现局部元素富集区域;二是相结构调控困难,后续真空退火过程中,固溶体相易发生分解,生成脆性金属间化合物,且退火温度升高会导致晶粒长大、晶格应变减小,使合金硬度与韧性呈反向变化,无法兼顾高强度与高塑性的协同需求;三是工艺耦合性差,球磨过程中的晶格应变与退火过程中的晶粒长大、相分解相互制约,难以通过单一工艺参数优化实现合金性能的综合

提升。

雷云龙等^[9]采用机械合金化粉末冶金工艺制备 AlCrCu_{0.5}Mo_{0.5}Ni 高熵合金粉末,该技术存在固有缺陷:球磨过程难以实现成分绝对均匀,即便球磨 40 h 仍有局部元素富集;后续真空退火时 BCC2 固溶体易分解,1 000 °C 下完全分解生成脆性 CrMo 相,且退火升温会致晶粒长大、晶格应变释放,使合金硬度与韧性反向变化,无法兼顾强塑协同。Laurent-Brocq 等^[10]采用放电等离子烧结粉末冶金工艺制备 Ni/CoCr-FeMnNi 复合高熵合金,该技术虽能实现合金高致密化成形,但在烧结过程中易出现合金元素非均匀扩散,难以精准调控相间化学梯度宽度;烧结易受模具接触产生碳污染,需采用额外工艺去除杂质相,不仅增加制备工序,还会影响合金最终的组织均匀性与性能稳定性。

总体而言,高熵合金传统制备技术的共性瓶颈表现为,冷却速率慢、组织精细调控难度大、缺陷难以有效抑制、复杂构件成形能力弱,促使研究人员转向激光加工等先进制造技术,寻求高熵合金高性能化制备的新路径。

3 激光技术高熵合金的核心优势

针对高熵合金传统制备技术中的成分偏析、组织粗大、缺陷频发、复杂构件成形困难等问题,激光技术凭借独特的能量特性与加工优势^[11],从热历程源头改变高熵合金的凝固行为、组织演化与缺陷生成规律,为高熵合金的高性能化制造提供了全新解决方案,其核心技术优势为:①超快热循环,抑制偏析与脆性相析出。激光作为高能量密度热源,可实现对材料局部区域的快速加热与超快冷却,大幅缩短高温停留时间,有效抑制多主元合金的元素扩散与成分偏析,避免脆性金属间化合物的大量生成,保障合金以简单固溶体相为主的相结构特征^[12]。②细晶强化,提升综合力学性能。激光作用下的超快冷却速率($10^3\sim 10^7$ K/s)可使熔体快速凝固,获得超细晶粒、高密度位错乃至非晶、纳米晶结构,充分发挥高熵合金的细晶强化与晶格畸变强化效应,实现合金强度、硬度与塑性的协同提升^[13]。③热影响区窄,降低基体损伤。激光加工的能量输入高度集中,热影响区窄,可有效减少对基体材料的热损伤,避免因热变形、热开裂导致的构件性能劣化,尤其适用于高熵合金的表面改性与精密连接^[14]。④工艺柔性强,适配多元制造需求。激光技术具备非接触加工、时空精度高的特点,既可实现复杂结构构件的近净成形,也可完成局部区域的精准表面强化与精密焊接,能够满足高熵

合金在不同服役场景下的多元化制造需求^[15]。

⑤成分与组织可控,实现定向改性。通过调控激光功率、扫描速度、扫描路径等工艺参数,可精准控制高熵合金的熔池温度、凝固速率与组织演化过程,实现合金成分、相结构与微观组织的定向调控^[16],满足不同应用场景的性能需求。

激光加工技术针对传统制备工艺痛点形成精准技术解决方案,其技术体系、组织调控路径与性能优化方向形成完整逻辑闭环,如图1所示。凭借上述优势,激光技术已广泛应用于高熵合金的制备成形、组织调控与性能优化,并逐步形成了激光增材制造、激光表面改性、激光焊接三大核心研究方向,为高熵合金从实验室研究走向工程化应用奠定了重要技术基础。

3.1 激光增材制造高熵合金的工艺与性能调控

激光增材制造是基于“分层制造、逐层叠加”原理的先进制造技术,可实现高熵合金复杂构件的近净成形,有效克服传统制造方法在复杂构件制备、成分与组织调控方面的局限^[17]。目前激光增材制造高熵合金的核心工艺为激光粉末床熔融与激光定向能量沉积,两类工艺各具技术特点,适用于不同类型构件的制备需求^[18]。激光增材制造的成形质量与微观组织、力学性能高度依赖于激光功率、扫描速度、铺粉层厚及预热温度等关键调控参数,不同参数变化会引发显著的组织演变与性能差异,其定

量对应关系如表1所示。

3.1.1 激光粉末床熔融:精密构件的高致密度成形

激光粉末床熔融^[23](选择性激光熔化)是一种高精度激光增材制造技术。工艺过程为:在惰性气氛保护下,将金属粉末均匀铺设于基板,高能量激光束按照三维切片数据选择性熔化粉末区域,形成冶金结合的熔覆层,完成一层后基板精准下降,重复铺粉与激光扫描过程,直至复杂构件成形。该工艺的核心优势^[24]为成形精度高、组织可控性强、致密度高,适用于高熵合金精密复杂构件的制备。

3.1.1.1 工艺参数与组织演化的定量关联

(1)激光功率对晶粒尺寸与缺陷形成的影响 激光功率升高会提升熔池温度、降低冷却速率,导致晶粒尺寸显著增大。研究表明,功率由200 W提升至400 W时,高熵合金平均晶粒尺寸可由1.0 μm 增至3.5 μm ,晶粒尺寸随功率升高呈近似线性增长趋势^[25]。功率过低会导致粉末熔化不充分,试样内部出现大量未熔合孔隙,致密度低于95%^[26];功率过高则引发Al、Ti等低熔点元素烧损,烧损率可达5%~12%,同时热应力急剧升高,热裂纹敏感性显著提升^[27]。

(2)扫描速度对元素偏析与晶粒细化的调控作用 扫描速度通过改变冷却速率影响元素扩散与晶粒生长。研究发现^[28],扫描速度由800 mm/s提高至2 000 mm/s时,高熵合金元素偏析程度由8%降至2%以下,组织均匀性提升75%。扫描速度提高可显著

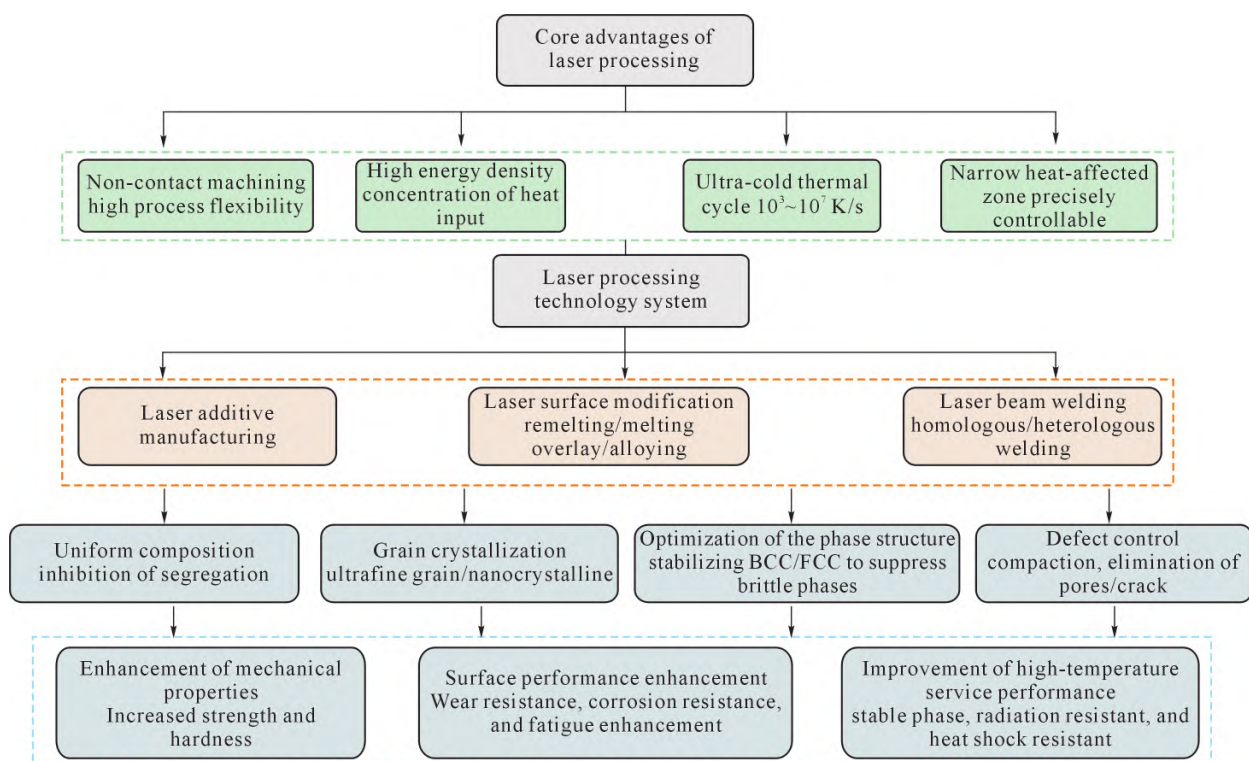


图1 激光加工高熵合金的技术体系、组织调控及性能优化逻辑

Fig.1 Technical system, microstructure control and performance optimization logic of laser-processed high-entropy alloys

表 1 增材制造高熵合金调控参数-微观组织-力学性能的定量对比

Tab.1 Quantitative comparison of the regulation parameters, microstructures and mechanical properties of additively manufactured high-entropy alloys

Control parameters	Microstructure evolution	Variation of mechanical properties
Increase of laser power	Significant reduction in pores and lack of fusion	Hardness and strength decrease, while ductility increases
	Equiaxed grains $\rightarrow$ coarse columnar grains	
	The B2 phase and brittle phases decrease, while the FCC phase increases	The strength decreases by approximately 5%~20%, and the elongation increases by 5%~15% ^[19]
Increase of scanning speed	Higher cooling rate leads to obvious grain refinement	Strength and hardness increase, while ductility decreases
	Finer cellular structure, suppressed segregation, elevated residual stress	The yield strength is increased by up to approximately 150 MPa ^[20]
Decrease of layer thickness	Density increases and defect rate decreases	The relative density reaches up to 99.9%, and the strength increases by approximately 8%~12% ^[21]
	The number of thermal cycles increases, and the microstructure becomes more uniform	
	The temperature gradient decreases, and thermal cracks are reduced significantly	
Increase of preheating temperature	Recrystallization is complete and dislocation density decreases	Ductility is greatly improved and brittle cracking is eliminated

加快凝固冷却速率,促进晶粒细化^[29]。此外,还有部分研究^[30]表明,扫描速度过快会导致能量输入不足,致密度下降;扫描速度过慢则易引发过热,导致晶粒粗化与热裂纹萌生。难熔高熵合金在1 000~1 600 mm/s 扫描速度范围内,冷却速率与扫描速度呈正相关,晶粒尺寸随扫描速度升高呈指数下降趋势^[31]。

(3)体能量密度对致密度与相组成的量化影响 体能量密度(E)是激光粉末床熔融的核心综合工艺参数,对高熵合金致密度、缺陷率及相组成具有显著调控作用^[32]。当 $E < 40 \text{ J/mm}^3$ 时,粉末熔化不足,试样致密度低于95%,气孔与未熔合缺陷率高于5%,相组成均匀性差;当 $E = 50 \sim 80 \text{ J/mm}^3$ 时,为最优工艺窗口,试样致密度高于99.5%,晶粒尺寸控制在 $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$,无明显元素偏析,以稳定的FCC或BCC单相固溶体为主;当 $E > 100 \text{ J/mm}^3$ 时,试样出现过热蒸发,热应力大幅增加,热裂纹敏感性提升3~5倍,晶粒明显粗化,易析出脆性金属间化合物^[33]。

3.1.1.2 典型案例

在难熔高熵合金制备中,激光粉末床熔融可通过工艺参数优化解决热应力引发的翘曲开裂问题。如Ron等^[34]采用激光粉末床熔融技术,以混合单质粉末原位合成WTaMoNbV难熔高熵合金。优化工艺下试样致密度达95%,为单一BCC固溶体,晶粒显著细化。合金硬度674 HV,抗压强度1 390 MPa,耐蚀性与电弧熔炼态相当且钝化膜更稳定,验证了该技术低成本制备高性能难熔高熵合金的可行性。Zhang等^[35]采用该工艺制备WTaMoNb难熔高熵合金时,通过构建FD-FE耦合数值模型,模拟3D温度场与热应力分布,明确温度分布不均缺陷生成的核心原因。基于模拟结果分步优化功率因子与扫描速度,降低熔池温度差与热应力,最终在低氧氩气氛下制备出无宏观裂纹、单一BCC固溶体相的复杂叶片构件,实现了难熔高熵合金精密构件的高质量成形(图2)。

多元主元高熵合金制备中,该工艺可通过参数

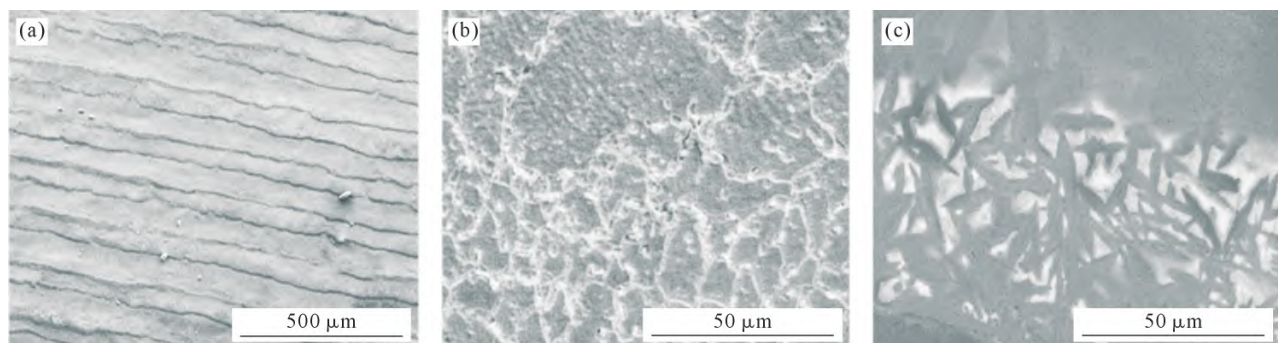


图2 WTaMoNb 难熔高熵合金通过改进工艺获得的试样表面枝晶组织:(a)俯视图;(b)晶粒组织;(c)枝晶组织^[35]
Fig.2 Dendritic structure at the sample surface of the WTaMoNb refractory high-entropy alloy through the improved process: (a) top view; (b) grain structure; (c) dendrite structure^[35]

调控实现高致密度与优异强塑匹配性。如 Song 等^[36]制备 $\text{Ni}_{40}\text{Co}_{18}\text{Cr}_{18}\text{Fe}_{14}\text{Al}_5\text{Ti}_5$ 高熵合金时,通过调控激光功率、扫描速度与扫描间距,使合金样品最低相对密度超 96.93%,最优参数下,到达 99.94% 的近全致密状态;力学性能上,所有样品屈服强度均超 740 MPa,拉伸伸长率逾 28%,最优试样屈服强度 811 MPa,极限强度 1 071 MPa,展现出卓越的强塑匹配性,证明了该工艺在高熵合金精密构件高性能成形中的应用潜力。

3.1.2 激光定向能量沉积:大尺寸构件与梯度材料的高效制备

激光定向能量沉积(激光金属沉积),通过高能激光束在基体表面形成熔池,同时由喷嘴将粉末或丝材同步送入熔池,材料熔化后快速凝固并逐层堆积成形^[37]。该工艺成形效率高、尺寸空间大、成分调控灵活,适用于高熵合金大尺寸构件制造、废旧构件修复再制造及功能梯度高熵合金的制备。该工艺的超快冷却速率可有效细化晶粒、抑制成分偏析^[38]。

3.1.2.1 关键参数与组织性能定量规律

激光定向能量沉积的冷却速率可达 $10^3\sim 10^6$ K/s,为真空电弧熔炼的 1 000 倍以上。快速凝固可显著抑制元素扩散,仅产生微米级轻微成分偏析,晶粒尺寸较熔炼态细化 60%~80%,形成典型的胞状与柱状亚结构。激光功率与送粉速率匹配直接影响成形质量^[39],250~350 W 功率、8~12 g/min 送粉速率为最优区间,试样致密度高于 99%;送粉速率过快会导致未熔颗粒增多,功率过高则引发晶粒粗化,使显微硬度下降 15%~25%。

3.1.2.2 典型案例

Liu 等^[40]采用激光定向能量沉积(laser directed energy deposition, LDED)制备 $\text{AlCu}_x\text{CoCrFeNi}_{21}$ 高熵合金,研究 Cu 含量对显微组织与 1 000 °C 高温氧化行为的影响。随 Cu 含量增加,合金由 FCC/BCC 片

层共晶组织转变为 FCC 柱状枝晶与 BCC 枝晶间组织,Cu 在枝晶边缘显著偏聚。适量 Cu 促进 Al_2O_3 生成,但过量 Cu 引入纳米 Cu_2O 并加剧热膨胀失配,导致氧化层开裂剥落,高温抗氧化性下降。Radhakrishnan 等^[41]采用激光定向能量沉积制备 CoCr_xFeNi 高熵合金,探究 Cr 含量对热导率与晶粒形貌的调控规律。结果表明,随 Cr 含量升高,合金热导率显著降低,冷却速率随之下降。低 Cr 合金热梯度沿扫描方向,晶粒呈锯齿状柱状晶;高 Cr 合金热梯度转向成形方向,晶粒跨层连续生长,为精准控制晶粒结构提供理论支撑。Li 等^[42]对比激光定向能量沉积与真空电弧熔炼制备的 NbMoTa 难熔中熵合金,发现激光定向能量沉积的冷却速率达 $10^3\sim 10^6$ K/s,是真空电弧熔炼的千倍之多。快速凝固结合成形过程中的反复热循环,大幅缩短元素扩散时间,使合金仅出现微米级轻微成分偏析,晶粒内形成典型的胞状与柱状亚结构(图 3),元素分布远优于电弧熔炼制备的合金。

在轻质难熔高熵合金制备中,LDED 可实现低密特性与优异力学性能的协同。Zhang 等^[43]采用激光定向能量沉积制备 $\text{Al}_{0.3}\text{NbTi}_3\text{VZr}_{1.5}$ 轻质难熔高熵合金,其密度仅 5.75 g/cm^3 ,沉积态显微组织以 BCC 为基体,晶界分布 AlZrV Laves 相,基体内部弥散分布 ω 相,如图 4a 所示。由图 4b 可以看出,1 100 °C 固溶处理后,Laves 相消失, ω 相细化至纳米尺度,合金屈服强度达 $(1\,032\pm 12)\text{ MPa}$,断裂应变提升至 $(25\pm 2)\%$,实现了轻质难熔高熵合金高强度与高延展性的同步提升。

3.2 激光表面改性高熵合金的工艺类型与性能提升

激光表面改性是在不改变高熵合金基体整体成分的前提下,以高能量密度激光为热源,通过快速熔化、凝固、合金化或强塑性变形,实现合金表层组织与性能的精准调控,显著提升表面硬度、耐磨性、耐腐蚀性、抗疲劳性与高温性能的核心技术^[44]。依据材

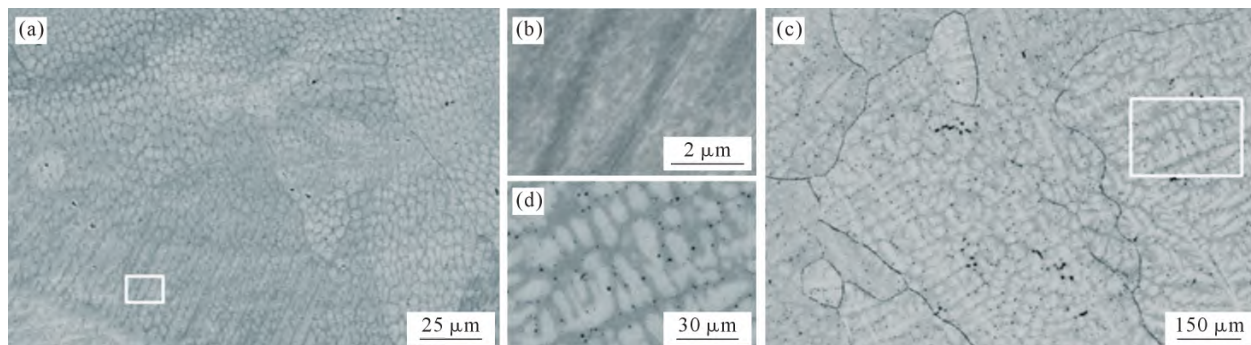


图 3 NbMoTa 高熵合金显微组织:(a)纵截面背散射电子像(激光金属沉积);(b)(a)中方框区域的背散射电子像及该区域元素面分布;(c)纵截面背散射电子像(真空电弧熔炼);(d)(c)中方框区域的背散射电子像及该区域元素面分布^[42]

Fig.3 Microstructure of the NbMoTa MEA: (a) BSE of longitudinal section (LMD); (b) BSE image by a square in (a) and the elemental distribution images of the area; (c) BSE of longitudinal section (VAM); (d) BSE image by a square in (c) and the elemental distribution images of the area^[42]

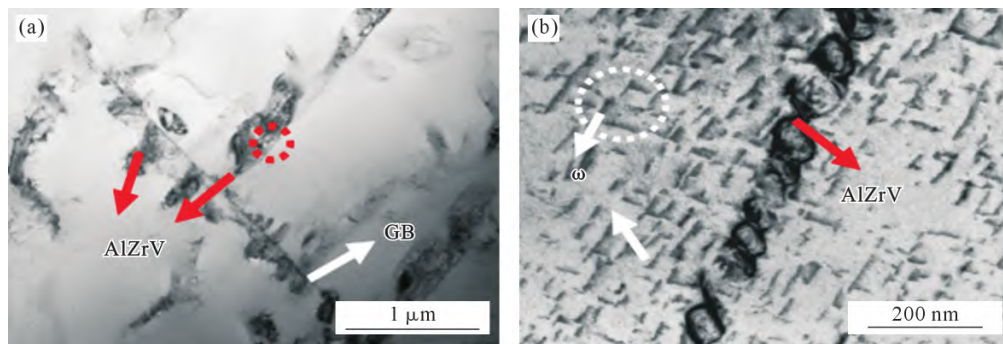


图4 $\text{Al}_{0.3}\text{NbTi}_3\text{VZr}_{1.5}$ 高熵合金的透射电镜表征:(a) 沉积态试样中 BCC 基体与 AlZrV 相的明场像;(b) 沉积态试样中 ω 相与 AlZrV 相的明场像^[43]

Fig.4 TEM characterization of the $\text{Al}_{0.3}\text{NbTi}_3\text{VZr}_{1.5}$ high-entropy alloy: (a) bright-field images of the BCC matrix and AlZrV phase of the as-deposited sample; (b) bright-field images of the ω and AlZrV phases of the as-deposited sample^[43]

料添加与否、作用机制与改性目标,主流工艺分为激光重熔、激光熔覆和激光合金化,其中激光重熔与激光熔覆研究最为深入、应用最为广泛。

3.2.1 激光重熔:原位致密化与表层组织优化

激光重熔是无外加材料的原位表面改性技术,通过激光快速扫描使高熵合金表层微米至数十微米区域瞬时熔化并高速自激凝固^[45],实现表层组织的快速淬火与再结晶,达到消除缺陷、细化晶粒、均匀成分的改性目标,多用于涂层二次致密化与构件表面局部强化^[46]。该工艺可有效提升高熵合金涂层的致密性与冶金结合性。Lyu 等^[47]采用激光重熔对 CoCrFeNiTa_x 高熵合金进行表面改性,随 Ta 含量升高,合金中 Laves 相比比例明显增加。激光重熔后晶粒显著细化,元素分布更均匀,表面形成致密重熔层,残余应力与成分偏析得到有效抑制。Ta 元素通过固溶强化与第二相强化提升硬度、耐磨性与耐蚀性,激光重熔进一步通过细晶强化实现协同增效,显著提升合金综合性能。Dong 等^[48]采用激光重熔对等离子喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层进行表面改性,实现原位致密化与组织优化。结果表明,激光重熔使涂层孔隙率由 4.8% 降至 0.3%,与基体形成良好冶金结合,保持 BCC 固溶体为主相。900 °C 氧化 100 h 后,重熔涂层表面生成连续致密的多层氧化膜(图 5),有效阻碍氧扩散,显著提升高温抗氧化性,该工艺实

现了涂层致密化与高温防护协同提升。

董天顺等^[49]在 AISI 1045 钢表面制备等离子喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层后,采用激光重熔工艺优化性能,涂层孔隙率从 4.8% 降至 0.3%,孔隙、裂纹等缺陷基本消除,涂层与基体由机械结合转变为冶金结合;电化学测试表明,重熔后的涂层在 3.5%NaCl 溶液中自腐蚀电位从 -0.421 6 V 升至 -0.282 1 V,腐蚀电流密度大幅降低,耐腐蚀性显著提升。激光重熔可通过合金成分调控实现改性性能的优化。李邱达等^[50]采用冷喷涂辅助激光重熔技术,在 45 钢表面制备 $\text{AlCo}_x\text{CrFeNiCu}$ ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$) 高熵合金涂层,重熔后涂层消除预制层缺陷,与基体形成冶金结合带,组织由等轴与柱状树枝晶组成(图 6);随 Co 含量增加,等轴树枝晶逐渐增多并细化,在 3.5%NaCl 介质中, $x=0.5$ 时涂层耐腐蚀性最优,自腐蚀电位达 -0.325 V,腐蚀速率仅 2.28×10^{-3} mm/a,实现了高熵合金涂层耐腐蚀性的定向调控。

3.2.2 激光熔覆:异质涂层制备与表层性能强化

激光熔覆^[51]是目前激光表面改性中研究最活跃、应用最广泛的工艺,利用高能量密度激光束快速熔化同步输送的合金粉末与基体表层,形成成分全新、低稀释率、冶金结合的致密涂层,冷却速率可达 $10^5 \sim 10^7$ K/s;该工艺热输入可控、加工柔性高,可在复杂形状部件上实现成分精准可控的涂层制备,

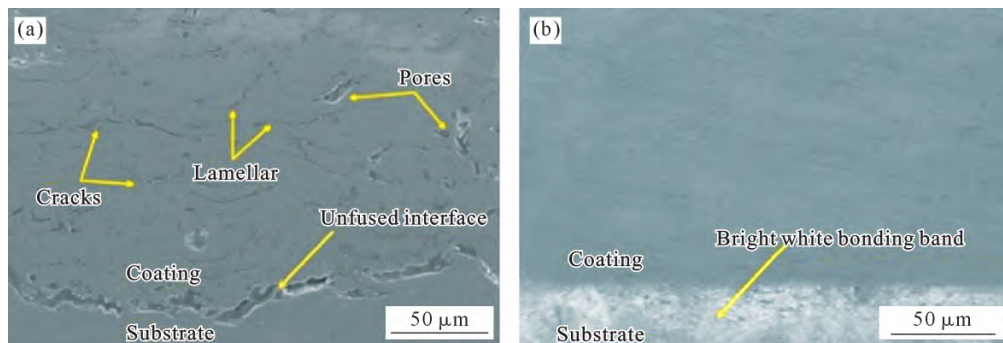


图5 AlCoCrFeNi 涂层截面形貌:(a) 喷涂态涂层;(b) 重熔态涂层^[48]

Fig.5 AlCoCrFeNi cross-sectional morphology of the coatings: (a) as-sprayed coating; (b) remelted coating^[48]

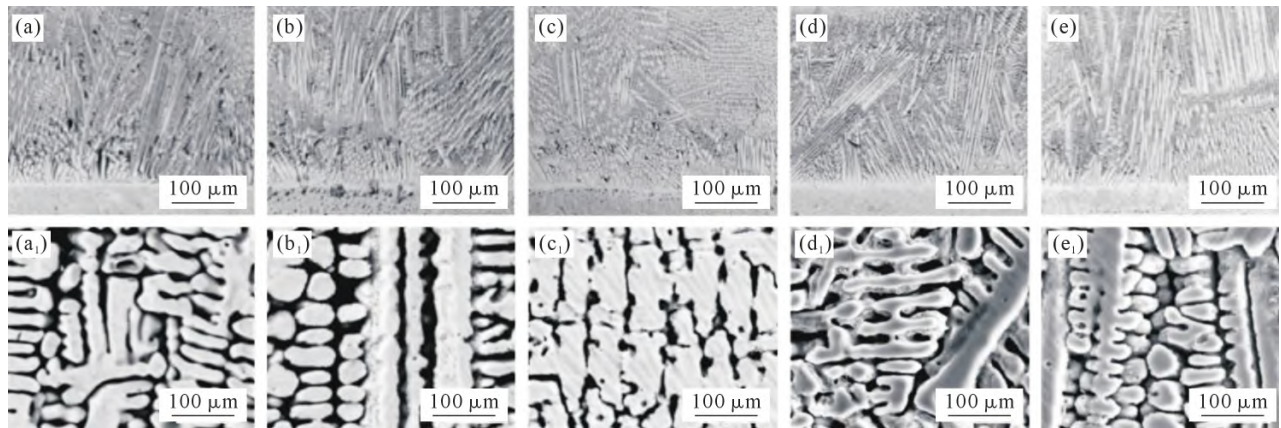


图6 激光重熔合成 $\text{AlCo}_x\text{CrFeNiCu}$ 高熵合金涂层截面、表面 SEM 图像:(a, a_i) $x=0$; (b, b_i) $x=0.5$; (c, c_i) $x=1$; (d, d_i) $x=1.5$; (e, e_i) $x=2$ ^[49]

Fig.6 SEM images of the cross-section and surface of the $\text{AlCo}_x\text{CrFeNiCu}$ high-entropy alloy coatings synthesized by laser remelting: (a, a_i) $x=0$; (b, b_i) $x=0.5$; (c, c_i) $x=1$; (d, d_i) $x=1.5$; (e, e_i) $x=2$ ^[49]

大幅提升基体表面的耐磨、耐蚀、高温抗氧化等性能^[52]。通过合金元素掺杂可实现熔覆涂层相结构与性能的定向调控。Ma 等^[53]在 45 钢表面激光熔覆制备 CoCrFeNiMnTi_x 高熵合金涂层,系统研究 Ti 元素掺杂对涂层组织与性能的调控规律。结果表明,涂层以 FCC 单相固溶体为主,组织以枝晶与等轴晶为主,且随 Ti 含量增加,等轴晶比例上升。Ti 元素通过细晶强化与固溶强化显著提升涂层硬度,当 $x=0.8$ 时硬度最高达 823 HV;同时有效降低摩擦系数,改善磨粒磨损与粘着磨损,大幅提升耐磨性。此外,Ti 元素可优化钝化膜结构,使腐蚀电位正移、腐蚀电流密度降低,显著增强涂层耐蚀性,为 45 钢表面强韧化与防腐改性提供了有效方案。

Xie 等^[54]采用激光熔覆在 TC11 钛合金表面制备 $(\text{FeCoNiCrMo})_{97.7}\text{B}_{1.1}\text{Si}_{1.2}$ 高熵合金涂层,实现异质涂层制备与表层性能强化。涂层与基体形成良好冶金结合,保持 FCC 单相结构。500~700 °C 氧化 108 h 后,涂层表面生成致密连续 Cr_2O_3 保护膜,氧化增重仅为基体的 22%~27%,高温抗氧化性显著提升,该工艺有效抑制氧扩散并改善了表层高温稳定性。

高玉龙等^[55]的研究表明,在 Q235 钢表面激光熔覆 CoCrNiMnTi_x 高熵合金涂层时,发现 Ti 含量

对涂层物相组成与性能具有显著调控作用:Ti 摩尔分数 ≤ 0.25 时,涂层为单一 FCC 固溶体相;Ti 摩尔分数增至 0.5 时,析出 $(\text{Co, Fe})_2\text{Ti}$ 型 Laves 相,形成 FCC+Laves 复合结构;Ti 含量继续增加,Laves 相占比进一步提升。固溶强化与第二相强化协同作用,使涂层显微硬度从 165.33 HV_{0.1} 增至 523 HV_{0.1},纳米硬度最高达 6.91 GPa,耐磨性大幅提升(图 7)。

单元素掺杂可针对性优化高熵合金熔覆涂层的高温摩擦学性能。Zhu 等^[56]在 304 不锈钢表面激光熔覆 FeCoCrNiCu_x 、 FeCoCrNiSi_x 高熵合金涂层,探究 Cu、Si 掺杂的调控作用,如图 8 所示。发现 600 °C 高温下,Cu 元素可提高涂层导热性与基体冶金结合强度,增强涂层韧性并发挥断裂缓冲作用;Si 元素通过晶粒细化提升加工硬化程度,二者均显著提升涂层耐磨性,其中 Si 掺杂涂层磨损率较基体大幅降低,高温耐磨性能最优。

3.2.3 激光合金化

激光合金化^[57]通过激光将合金粉末与基体表层熔化混合,实现基体表层的成分合金化,形成具有特定性能的合金化层,可根据服役需求精准调控表层成分,实现耐磨性、耐腐蚀性、高温性能的靶向提升,适用于高熵合金表层的定制化改性;激光冲击强化

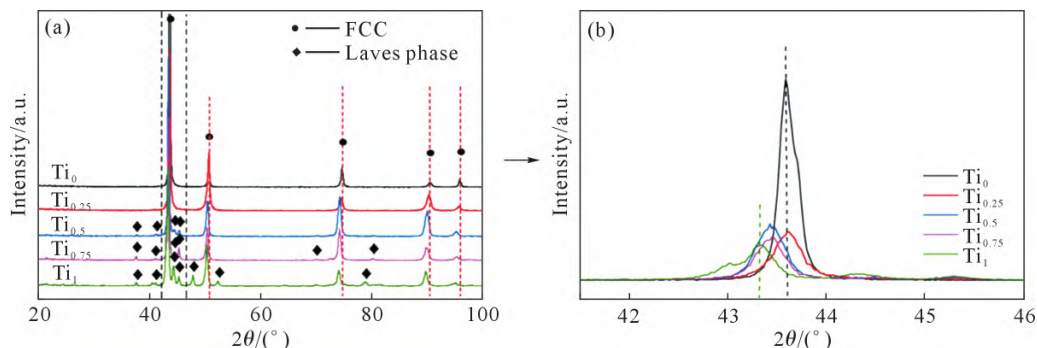
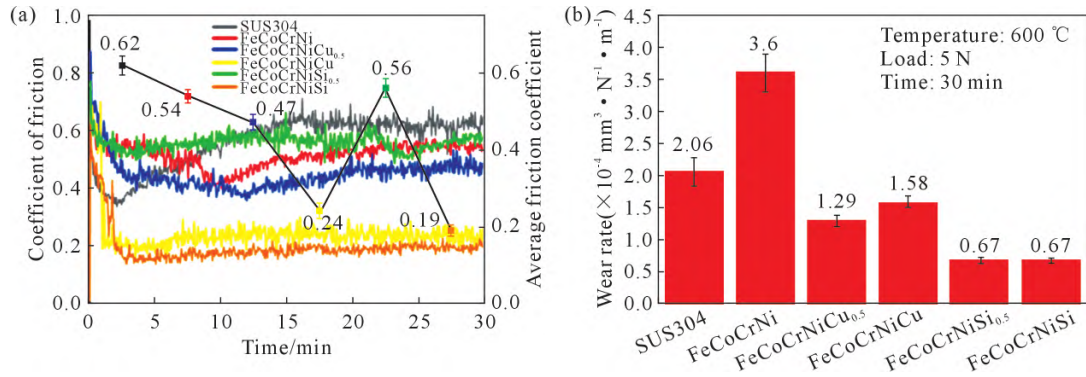


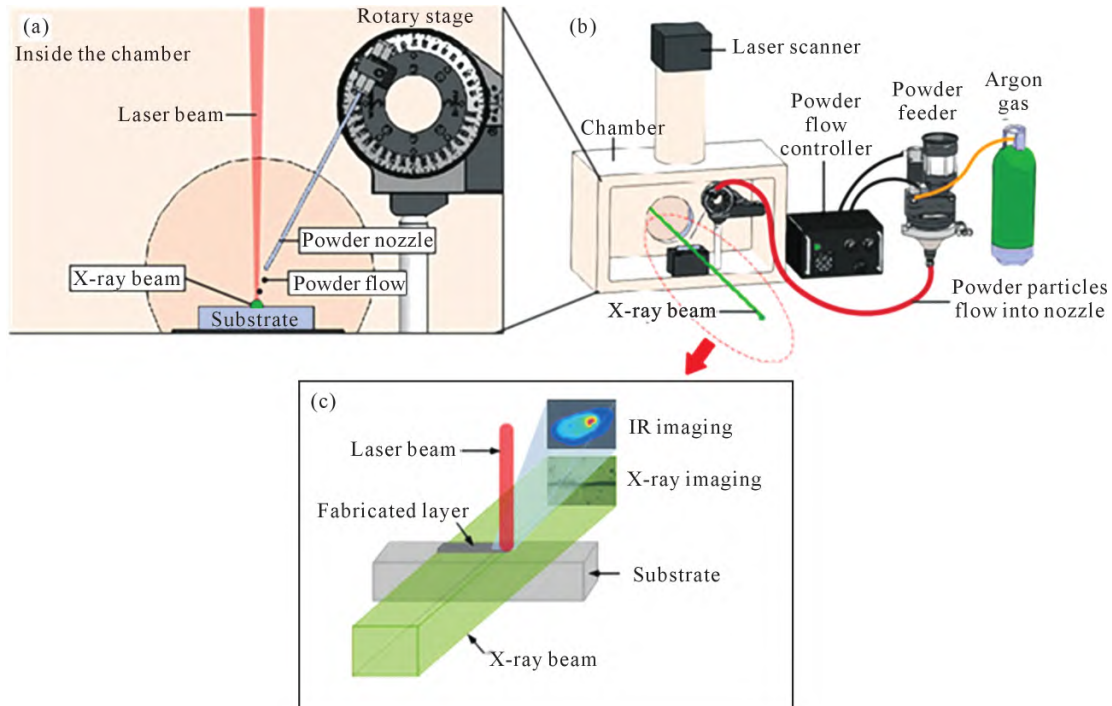
图7 CoCrNiMnTi_x 涂层 XRD 谱:(a) XRD 谱;(b) (a)中截取的一段峰^[55]

Fig.7 XRD patterns of CoCrNiMnTi_x coatings: (a) XRD patterns; (b) a segment of the peak intercepted from (a)^[55]

图 8 600 °C 条件下高熵合金涂层的摩擦学性能:(a) 摩擦系数曲线;(b) 磨损率^[56]Fig.8 Tribological performance of high-entropy alloy coatings at 600 °C: (a) friction coefficient curves; (b) wear rate^[56]

则利用激光诱导的等离子体冲击波,对高熵合金表层进行冷塑性变形,引入高密度位错与残余压应力,无需改变表层成分,即可显著提升合金的抗疲劳性能与表面硬度,且热影响区极小,适用于精密高熵合金构件的表面强化。两类工艺为高熵合金表层性能的多元化调控提供了补充路径,具有良好的应用前景。Wang 等^[58]采用激光定向能量沉积技术原位合金化制备 MoNbTiV 难熔高熵合金,设定 260 W 激光功率、200 mm/s 扫描速度等工艺参数(图 9),结合同步辐射高速 X 射线与红外成像技术,实现熔池热行为、粉末输送及熔流动力学的原位观测,精准获得粉末输送速度、熔池驻留时间等关键数据,最终实现合金元素近均匀分布,为激光合金化制备难熔高熵合金的工艺优化与机理研究提供了先进表征方法和重

要理论支撑。Gou 等^[59]采用激光合金化技术在 Cr-CoFeNi FCC 高熵合金表面实现铝元素合金化,原位生成均匀致密的 Al_{1.5}CoCrFeNi BCC 改性层,与基体形成良好冶金结合。改性层平均晶粒尺寸约 12 μm,显微硬度高达 536 HV,为基体的 3 倍左右。硬质 BCC 相的形成与细晶强化共同作用,使改性层磨损率较原始试样降低约 80%,摩擦系数由 0.76 降至 0.60,磨损机制由严重粘着磨损转变为轻微氧化磨损。Liang 等^[60]采用选择性激光熔化原位合金化技术制备 AlCrCuFeNi_x 双相高熵合金,系统研究激光工艺参数对合金化程度、微观组织与抗压性能的影响。结果表明,激光功率直接调控合金元素扩散均匀性与相组成,低功率下合金化程度较低,残余 BCC 相使合金抗压屈服强度达 689.02 MPa;随功率升高,FCC

图 9 定向能量沉积增材制造高速 X 射线成像实验装置示意图:(a) 成形腔内部局部放大图;(b) 整套实验设备;(c) 双成像同步观测原理图^[58]Fig.9 The schematic of the experimental setup of high-speed X-ray imaging of DED AM: (a) enlarged schematic view of the interior observation zone inside the processing chamber; (b) overall layout of the complete DED-AM experimental setup; (c) schematic of synchronous dual imaging detection^[58]

相晶格畸变增大,BCC相占比降低,强度呈下降趋势。该合金在200 W、600 mm/s参数下综合力学性能最优,激光合金化实现了高熵合金的成分调控与强韧化协同,为激光表面改性高熵合金的组织性能精准调控提供了实验依据。

3.3 激光焊接高熵合金的连接特性与接头性能调控

高熵合金因多主元构成、晶格畸变显著及元素易偏析的特性,常规熔焊过程中易出现晶粒粗大、元素烧损、热裂纹、界面脆性相等缺陷,严重降低焊接接头的力学性能与结构可靠性。激光焊接凭借高能量密度、超快热循环、窄热影响区、焊接变形小及工艺可控性强等优势^[61],可有效抑制元素偏析、细化焊缝组织、优化界面结合状态,成为高熵合金连接领域极具发展潜力的先进焊接技术。根据待焊母材组合形式,高熵合金激光焊接分为同种材料连接与异种材料连接两大类,二者的研究重点与性能调控难点存在显著差异。

3.3.1 同种材料连接

高熵合金同种材料激光焊接是高熵合金连接领域最基础、研究最成熟的形式,利用高能量密度激光束快速熔化相同成分的高熵合金母材,使界面微熔并快速凝固(冷却速率可达 $10^4\sim 10^6$ K/s),形成成分均匀、冶金结合良好的焊接接头。该工艺热输入集中、热影响区窄,可有效抑制多主元特性引发的元素偏析与晶粒粗大问题,实现接头成分与母材的一致

性,保障接头力学性能与母材匹配,适用于高熵合金构件的制备与修复。工艺参数优化可实现焊接接头性能的超母材提升^[62]。Li等^[63]对AlCoCrFeNi_{2.1}共晶高熵合金开展旋转摩擦焊(激光焊接衍生工艺)研究,焊接接头分为母材、热影响区、热机械影响区和动态再结晶区,各区域组织呈现不同演化特征;当摩擦压力为200 MPa时,接头实现充分动态再结晶,焊缝界面消失,抗拉强度达913.5 MPa、伸长率12.1%,性能均超过母材,拉伸断裂发生在远离焊缝中心的母材区域,实现了高熵合金同种连接的高性能化。如图10所示清晰展示了AlCoCrFeNi_{2.1}合金焊接接头各核心区域的显微组织,形态均超过母材性能,拉伸断裂也发生在远离焊缝中心的母材区域。

焊缝组织演化是影响接头性能的核心因素。Palguna等^[64]采用钨极气体保护焊实现锻造轧制态Al_{0.2}CoCrFeNiMo_{0.5}高熵合金的同质焊接,获得无缺陷全熔透接头,接头各区域均保持FCC基体与 σ 相的双相组成,但形态存在显著差异:母材中 σ 相呈不规则颗粒状分布,热影响区为破碎的共晶层片状 σ 相,熔合区则形成铸态FCC枝晶与连续枝晶间 σ 相。连续枝晶间的脆性 σ 相易引发裂纹萌生与扩展,导致接头塑性显著降低,断裂集中于熔合区,表明焊缝组织的精细化调控是提升同种焊接接头性能的关键。

3.3.2 异种材料连接

高熵合金异种材料激光焊接是拓展高熵合金工

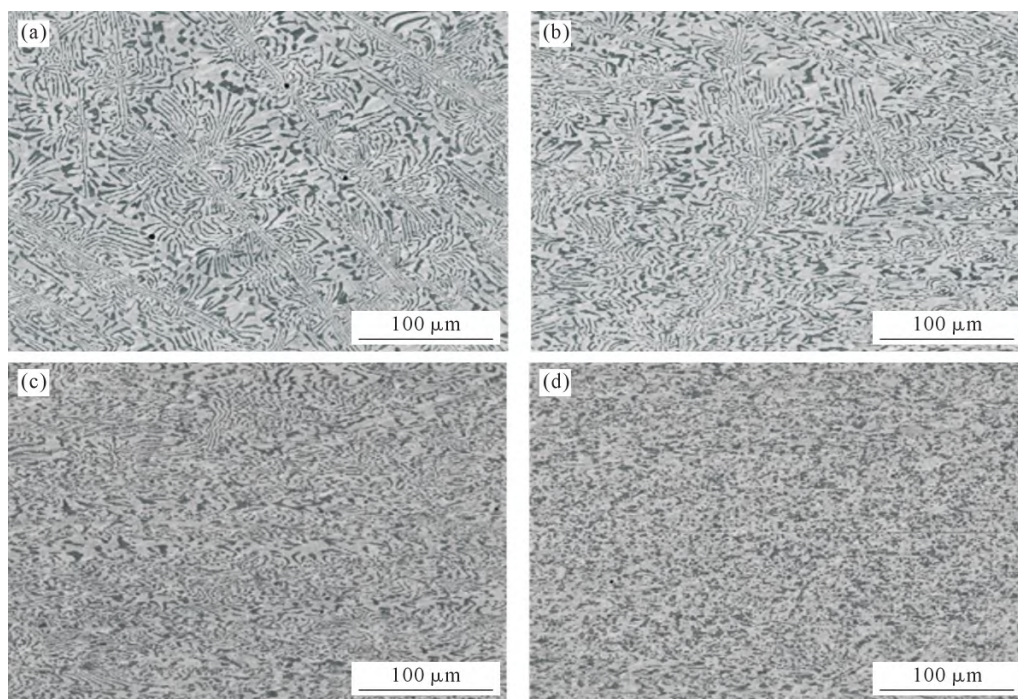


图10 AlCoCrFeNi_{2.1}在120 MPa摩擦压力下焊接接头中各区域的显微组织:(a)母材;(b)热影响区;(c)热力影响区;(d)动态再结晶区^[63]

Fig.10 AlCoCrFeNi_{2.1} high-entropy alloy microstructures of different zones in the joints welded with a friction pressure of 120 MPa: (a) BM; (b) HAZ; (c) TMAZ; (d) DRZ^[63]

程应用的关键技术,可实现高熵合金与传统工程金属(不锈钢、钛合金等)或不同高熵合金的精密连接^[65];通过精准调控焊接参数,使异种母材界面微熔并快速凝固,形成冶金结合接头,有效缓解异种材料间成分差异、晶格错配带来的界面脆化问题,抑制有害金属间化合物生成,推动高熵合金与现有工程材料的集成应用^[66]。焊后热处理对异种焊接接头硬度具有显著调控作用。Adomako 等^[67]采用激光焊接制备 CoCrFeMnNi 高熵合金与双相不锈钢(DSS)异种接头,探究焊后热处理的影响。发现随热处理温度从 800 °C 升至 1 000 °C,高熵合金母材、DSS 母材及焊缝硬度均呈下降趋势(图 11),核心原因是高温下材料发生再结晶与晶粒长大,高熵合金晶粒尺寸从 3.4 μm 增至 69.5 μm。此外,搭接接头上下部的铁素体未完全混合区域,因相组成与元素分布特性表现出最高显微硬度,为异种接头硬度的调控提供了思路,熔合区组织演化是异种焊接接头的性能薄弱点。Oliveira 等^[68]对轧制态 CoCrFeMnNi 高熵合金与 316 不锈钢开展异种激光焊接,获得无缺陷全熔透接头。结果表明,焊接热循环仅引发窄幅热影响区,熔合区因两种母材元素均匀混合形成单一 FCC 相新固溶体,316 不锈钢中的碳融入实现固溶强化,使熔合区硬度显著提升;但激光焊接非平衡凝固下,熔合区生成粗大柱状晶,成为力学性能薄弱区,接头室温抗拉强度达 449 MPa,伸长率约 5%,断裂均发生在熔合区,表明熔合区组织的细化调控是提升异种焊接接头性能的核心方向。Sang 等^[69]采用电子束焊接实现 TiZrNbTa 难熔高熵合金与 TC4 钛合金的异种连接,获得无宏观缺陷接头。熔合区为柱状晶与等轴晶复合组织,界面存在元素扩散与未混合区,焊缝由 BCC 固溶体与金属间化合物组成。接头抗拉强度 389 MPa,抗压性能优异,但室温塑性较差、呈脆性断裂,断裂位于 TiZrNbTa 侧热影响区,证实了该

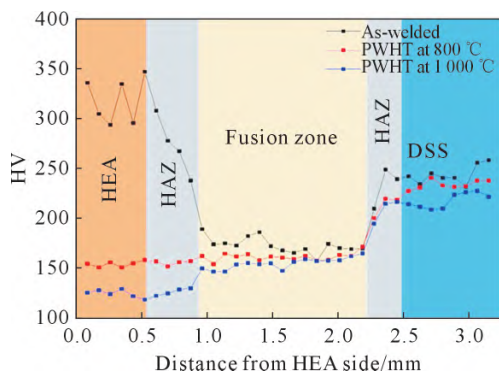


图 11 CrFeMnNi 高熵合金不同接头界面的显微硬度分布曲线^[67]

Fig.11 CoCrFeMnNi high-entropy alloy microhardness distribution profiles of the various joint interface^[67]

异种连接的可行性。Afonso 等^[70]采用脉冲激光实现轧制态 CoCrFeMnNi 高熵合金与 Inconel 718 高温合金的异种连接,获得无裂纹、无气孔的全熔透接头。熔合区为 FCC 基体与少量 Laves 相复合组织,元素混合均匀,热影响区狭窄且两侧组织演化存在明显差异。接头抗拉强度达 822 MPa,断裂应变 7.1%,硬度介于两种母材之间,断裂形式为韧脆混合断裂。Gu 等^[71]采用 CoNiCuNb_{0.5}V_{1.5} 高熵合金作为填充层,对 TC4 与 6082 铝合金进行激光搭接焊,通过控制钛侧熔化量抑制脆性 Ti-Al 化合物生成。焊缝由 FCC 相和 V 基固溶体组成,界面仅含少量韧性 Al₃V 相,接头无气孔、裂纹,最大剪切强度 190 MPa,断裂呈韧脆混合特征,焊缝最高硬度 600 HV。

4 激光加工高熵合金的技术局限与适用边界

尽管激光加工在高熵合金的制备、改性与性能调控方面具备显著优势,但受快速热循环特性、材料体系特性、装备与原材料成本及制造效率等因素制约,该技术仍存在明确的应用边界与技术局限。在实际工程应用中,需结合合金体系特征、构件尺寸、性能需求与成本目标,对激光加工的适用性进行合理界定。

激光加工的快速加热与剧烈冷却过程会产生极高温度梯度与残余热应力,使得该工艺对高裂纹敏感性合金体系存在明显适配局限。难熔高熵合金因高熔点、高硬度、低塑性及高热膨胀系数,在激光快速凝固条件下热裂纹、冷裂纹与层间开裂倾向显著,即便通过预热与工艺参数优化,仍难以完全消除开裂风险^[72];高 Al、高 Ti 与高 Si 含量高熵合金在激光非平衡凝固过程中,易加剧脆性 Laves 相、σ 相等金属间化合物的析出与相偏析,引发界面脆化与韧性下降^[73];大尺寸及大厚度构件在激光加工中易出现内部温度场不均、应力累积,进而产生翘曲变形与分层开裂^[74],对工艺稳定性与装备条件提出严苛要求。

在成本方面,激光加工高熵合金整体成本显著高于传统制备工艺。激光增材制造所需的高纯、球形、高流动性专用高熵合金粉末制备流程复杂、成材率低,价格为传统不锈钢与钛合金粉末的 3~10 倍;高精度激光加工装备及其配套的惰性气氛保护、在线监测、预热与后热系统投资高昂,运行能耗、维护与耗材成本进一步推高整体支出,使得激光加工更适用于小批量、定制化、高附加值构件,难以在大批量低成本生产场景中与传统铸造、锻造、轧制等工艺形成竞争。

在制造效率方面,激光加工在大尺寸构件制备中存在明显瓶颈。激光粉末床熔融等工艺受铺粉与单点扫描模式限制,沉积效率较低、制备周期较长,难以满足超大尺寸简单结构件的快速制造需求;随构件尺寸增大,温度场与应力场均匀性降低,组织与性能沿空间方向呈现显著梯度,难以保证全尺寸性能一致性;同时,激光成形件通常存在残余应力、表面粗糙度偏高及内部微小缺陷等问题,需配套热处理、喷砂、机加工与无损检测等后处理工序,进一步降低整体制造效率。

此外,激光加工高熵合金仍存在难以规避的工艺与性能固有短板。快速凝固过程易引入气孔、未熔合、球化与夹杂等缺陷,工艺参数微小波动即可造成组织与性能大幅波动^[75];强热循环产生的高残余拉应力难以通过常规工艺彻底消除,易引发构件变形、开裂及疲劳性能劣化^[76];凝固组织中柱状晶沿沉积方向择优生长,使得构件力学性能呈现明显各向异性,横向与纵向的强度、塑性差异可达15%~30%^[77],限制其在多向承载工况下的应用。

综合上述技术局限与约束条件,可对激光加工高熵合金的适用场景进行明确界定。该技术优先适用于复杂精密结构件、高性能表面强化件、异种材料连接件、梯度功能构件,以及航空航天、核能、海洋工程、生物医用等领域的小批量高端装备构件;而对于大尺寸简单结构件、大批量低成本通用构件、无预热条件下的高裂纹敏感性难熔高熵合金成形,以及对整体韧性与疲劳性能要求极高的关键承力构件,激光加工不具备应用优势,应优先选择传统制备与加工技术。

5 激光-高熵合金相互作用的基础科学问题

激光增材制造、激光表面改性与激光焊接虽加工形式与应用目标不同,但均以高能密度激光为热源,三类工艺虽在加工形式、应用场景上存在差异,但均以高能激光超快热循环为核心物理过程,共同面临快速凝固相变、元素分布、缺陷生成、热应力演化四大共性科学问题。这些科学问题并非抽象存在,而是直接对应并贯穿于三大激光工艺的全过程,是决定高熵合金组织与性能的本质根源^[78]。

5.1 快速凝固条件下的相选择与组织细化机制

激光加工的冷却速率可达 $10^3\sim 10^7$ K/s,远高于传统熔炼、烧结与焊接工艺,能够迫使高熵合金在非平衡条件下凝固。粉末床熔融与定向能量沉积过程中,熔池快速凝固抑制脆性金属间化合物析出,优先

形成BCC/FCC简单固溶体,同时获得超细胞晶、柱状晶与纳米晶组织,直接决定构件强塑匹配^[79]。激光重熔、激光熔覆的超快冷却使表层实现晶粒超细化,甚至形成非晶及纳米晶结构,显著提升表面硬度、耐磨性与耐蚀性。激光焊接中焊缝区快速凝固抑制元素扩散与相分解,保持与母材相近的相结构,同时细化焊缝组织,缩小热影响区范围,保障接头力学性能^[80]。

5.2 元素偏析抑制机理

高熵合金多主元特性使其在传统制备中极易出现严重枝晶偏析与晶界偏聚,而激光快速凝固可将元素扩散时间压缩至毫秒至微秒量级,从动力学上抑制偏析,该机制在不同工艺中靶向解决不同问题^[81]:激光增材制造中抑制大尺寸构件成形过程中的成分不均,保证难熔高熵合金、轻质高熵合金沿沉积高度与扫描方向的成分一致性;激光表面改性中减少熔覆层、重熔层内部元素富集,避免因局部偏析引发硬脆相析出、涂层开裂或耐蚀性下降^[12]。激光焊接^[82]中缓解异种材料焊接界面的元素互扩散与晶界偏聚,降低Ti-Fe、Al-Fe、Ni-Al等脆性金属间化合物连续生成风险,提升接头界面稳定性。

5.3 缺陷形成与控制机制

在激光快速加热与凝固的强热循环作用下,高熵合金构件普遍面临气孔、微裂纹、未熔合、界面夹杂等缺陷问题。由于高熵合金通常具有高硬度、高熔点、低塑性的特点^[83],凝固收缩应力与热应力叠加极易诱发热裂纹与冷裂纹^[84]。同时,熔池流动不稳定、气体逸出不充分、元素烧损等问题也会加剧缺陷生成。因此,缺陷控制是各类激光加工技术共同面临的关键问题,也是实现高熵合金稳定服役的前提。

5.4 热应力与变形调控规律

激光局部加热会在材料内部形成极高温梯度,进而产生显著的热应力与残余应力,易导致构件变形、涂层开裂或接头失效^[85]。激光增材制造中逐层叠加的循环热应力易引发大尺寸构件翘曲与层间开裂,需通过预热、扫描路径优化调控应力场。激光表面改性中涂层与基体热物性差异导致界面应力集中,是熔覆层剥落、开裂的主要原因。激光焊接中焊缝与母材的温度梯度造成接头残余拉应力^[86],降低接头疲劳性能与长期服役稳定性。

6 展望

激光技术为高熵合金的高性能化制备与改性提供了全新路径,目前相关研究已取得显著进展,但整体仍处于从实验室研究向工业化应用过渡的阶段,尚未形成成熟的产业化体系,在基础理论、工艺技

术、材料体系及工程应用等方面仍存在诸多挑战。结合当前研究热点与高端制造的重大需求,未来激光技术在高熵合金领域的发展将朝着理论精准化、工艺智能化、材料多元化、应用工程化、制造绿色化的核心方向稳步推进,聚焦关键科学问题与技术瓶颈突破,实现从实验室基础研究到高端装备产业化应用的跨越式发展。

6.1 基础理论:突破多场耦合快速凝固核心机理

由于还未通过研究揭示激光与高熵合金交互的物理机制,多数研究仍停留在实验现象归纳,难以对工艺与性能进行量化判断。现阶段最突出的问题是,多场耦合条件下非平衡凝固的相演变规律、原子迁移路径尚不明确,也缺少可指导实验的“成分-工艺-组织-性能”关联模型,研究仍高度依赖反复试错。未来需要从物理本质出发,建立多场耦合下的快速凝固理论,定量描述激光作用下的相变、缺陷萌生与组织演变规律,为合金设计与工艺优化提供可靠理论支撑。

6.2 工艺技术:攻克智能化复合加工与缺陷控制瓶颈

激光增材制造、表面改性与焊接在实际应用中普遍面临裂纹、气孔、致密度偏低、尺寸精度波动等问题,缺陷控制与过程稳定性仍是制约质量的关键。现有工艺多依靠经验参数,缺少原位监测与动态调节能力,多激光协同、外场耦合等先进方式也未形成成熟的参数匹配方案。后续应重点发展复合加工技术,将激光与超声、电磁场等耦合以细化组织、抑制缺陷,并搭建在线检测与闭环控制平台,实时调控熔池、温度与应力状态,从根源上提升构件成形稳定性与可靠性。

6.3 材料体系:突破特种高熵合金成分设计与适配性难题

面向极端服役环境,现有高熵合金体系在耐高温、抗辐照、耐蚀、轻量化等方面仍存在性能短板,专用化材料开发明显滞后。同时,新型难熔、富铝、富钛等高熵合金在激光加工中易出现元素烧损、脆性相析出、热裂倾向大等问题,材料与工艺的适配性不足。因此我们不妨围绕航空航天、核工业、海洋工程等场景,定向设计功能梯度、高熵复合材料、轻质难熔、抗辐照等专用合金,并与激光工艺协同优化,抑制有害相、降低裂纹敏感性,实现性能精准调控。

6.4 工程应用:突破产业化标准与规模化制备壁垒

激光加工高熵合金目前仍以实验室小试样为主,而大尺寸复杂构件因为制备成本高、效率低、性能一致性等各项问题难以保证其产量及质量,且行业内对此缺少统一的性能评价方法与标准,导致该

项技术难以进入工业化应用。对此可以典型工况为牵引,在高温结构件、抗辐照部件、耐蚀耐磨件等方面开展工程示范,加快建立从原材料、加工过程到成品检测的规范体系。同时优化近净成形与批量化生产工艺,提升构件稳定性与经济性,推动高熵合金从实验室走向实际装备应用。

6.5 绿色制造:构建短流程低能耗激光加工体系

现有激光制备高熵合金存在粉末成本高、流程长、能耗大等问题,因此高熵合金粉末低成本、低氧含量绿色制备技术;短流程激光近净成形与废旧构件激光修复再制造技术等方面都存在一定的技术瓶颈。同时结合本文研究中激光增材制造、激光熔覆的高效成形优势,通过开发低能耗激光加工装备与短流程制备工艺,推进高熵合金粉末回收利用、废旧构件激光修复再制造,降低生产能耗与材料成本,实现全生命周期绿色制造,助力高熵合金工业化批量应用势在必行。

随着基础理论不断完善、关键技术瓶颈持续突破、装备水平逐步提升,激光技术与高熵合金的深度融合必将打破现有应用壁垒,为先进制造与极端环境材料领域提供核心技术支撑,展现出广阔产业化前景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 宋鑫芳,张勇. 高熵合金研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(5): 451-547.
SONG X F, ZHANG Y. Progress of high entropy alloys[J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(5): 451-547.
- [3] 隋艳伟,陈霄,戚继球,何业增,孙智. 多元高熵合金的研究现状与应用展望[J]. 功能材料, 2016, 47(5): 5050-5054.
SUI Y W, CHEN X, QI J Q, HE Y Z, SUN Z. Research progress of high-entropy alloys with multi-principal elements and its prospective application[J]. Functional Materials, 2016, 47(5): 5050-5054.
- [4] 王先珍,王一涵,俞嘉彬,王辉,刘雄军,吴渊. 高熵合金性能特点与应用展望[J]. 精密成形工程, 2022, 14(11): 73-80.
WANG X Z, WANG Y H, YU J B, WANG H, LIU X J, WU Y. A brief review about perspective and properties of high-entropy alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(11): 73-80.
- [5] 何胜豪,程芳,夏松钦,刘薇,郭冰,郭驾宇,沈杭燕. 高熵合金的制备及性能[J]. 热加工工艺, 2022, 51(18): 22-29.
HE S H, CHENG F, XIA S Q, LIU W, GUO B, GUO J Y, SHEN H Y. Preparation and properties of high-entropy alloys[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(18): 22-29.
- [6] 柳建,彭振,王海斗,李静,仝永刚,肖翊. 真空电弧熔炼 FeCoNi-CrMnAl_{0.5}(Si_{0.5})高熵合金的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2024,

- 37(3): 157-164.
- LIU J, PENG Z, WANG H D, LI J, TONG Y G, XIAO Y. Tribological properties of $\text{FeCoNiCrMnAl}_{0.5}(\text{Si}_{0.5})$ high entropy alloy melted via vacuum arc melting[J]. *China Surface Engineering*, 2024, 37(3): 157-164.
- [7] ZHUO L C, SUN J C, CHEN B Q, ZHAN M R, JIANG C H. Microstructure and mechanical performances of novel multi-phase refractory high entropy alloys in Ti-Zr-V-Mo fabricated by vacuum arc melting[J]. *Vacuum*, 2023, 217: 112544.
- [8] OTTO F, YANG Y, BEI H, GEORGE E P. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(7): 2628-38.
- [9] 雷云龙, 杨康, 辛越, 姜自滔, 童宝宏, 张世宏. 机械合金化 $\text{AlCrCu}_{0.5}\text{Mo}_{0.5}\text{Ni}$ 高熵合金及其后续退火态的结构演化[J]. *金属学报*, 2025, 61(5): 731-743.
- LEI Y L, YANG K, XIN Y, JIANG Z T, TONG B H, ZHANG S H. Microstructure evolution of mechanically-alloying and its subsequently-annealed $\text{AlCrCu}_{0.5}\text{Mo}_{0.5}\text{Ni}$ high-entropy alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2025, 61(5): 731-743.
- [10] LAURENT-BROCQ M, MEREIB D, GARCIN G, MONNIER J, PERRIÈRE L, VILLEROY B. Chemical architecturation of high entropy alloys through powder metallurgy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 835: 155279.
- [11] LAN Y K, GUO W M, YU S B, ZHENG H H, ZHANG Y X, WANG X F, ZHAO S, LIU G Z, ZHANG J F, LIU B. High-temperature wear behavior of precipitation-strengthened high-entropy alloy composite coatings developed by laser cladding technology[J]. *Tribology International*, 2026, 216: 17.
- [12] LIU Y F, CUI X F, JIN G, WEN X, WANG S, ZHANG Y P. New nano-lamellar eutectic high-entropy alloy coating by laser cladding[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2024, 320: 129469.
- [13] CHENG W, JI L F, ZHANG L T, WANG H, SUN W G. Refractory high-entropy alloys fabricated using laser technologies: A concrete review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 7497-7524.
- [14] AN Y J, ZHU L, JIN S H, LU J J, LIU X Y. Laser-ignited self-propagating sintering of AlCrFeNiSi high-entropy alloys: An improved technique for preparing high-entropy alloys[J]. *Metals*, 2019, 9(4): 438.
- [15] ZHANG M N, WANG Y S, ZHOU Y H, WANG D F, YANG X, CHENG D X, MOHSAN A U, TANG J N, ZHANG G Y. Surface morphology evolution and tribological properties of laser directed energy deposited CoCrFeNi high-entropy alloys using laser polishing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1022: 179893.
- [16] MAHMOOD M A, ALABTAH F G, AL-HAMIDI Y, KHRAISHEH M. On the laser additive manufacturing of high-entropy alloys: A critical assessment of in-situ monitoring techniques and their suitability[J]. *Materials & Design*, 2023, 226: 111658.
- [17] ZHANG L, ZHANG H B, CAO H Z, CHEN X M, FANG Y, ZHENG G Q. Unveiling the corrosion-wear synergy in laser-deposited $\text{AlCoCrFe}_2\text{NiTi}_x\text{C}$ high-entropy alloy composite coatings via in-situ triboelectrochemical techniques[J]. *Corrosion Science*, 2025, 253: 113014.
- [18] SAENGCHAIRAT N, TRAN T, CHUA C K. A review: Additive manufacturing for active electronic components[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12(1): 31-46.
- [19] ZHOU K X, WANG Z J, HE F, LIU S F, LI J J, KAI J J, WANG J C. A precipitation-strengthened high-entropy alloy for additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 35: 101410.
- [20] XU Z L, ZHANG H, DU X J, HE Y Z, LUO H, SONG G S, MAO L, ZHOU T W, WANG L L. Corrosion resistance enhancement of CoCrFeMnNi high-entropy alloy fabricated by additive manufacturing[J]. *Corrosion Science*, 2020, 177: 108954.
- [21] ZHANG Y Y, QIN B L, OUYANG D, LIU L, FENG C S, YAN Y Q, YE S L, KE H B, CHAN K, WANG W H. Strong yet ductile refractory high entropy alloy fabricated via additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 81: 104009.
- [22] ZHANG H, LI C W, LIAO Y, KUANG X Y, YANG J L, NIU Y J, YANG X D, GU J F. Solid solution strengthening via WC particle in situ alloying in additive manufactured CoCrFeNi high-entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2026, 959: 150012.
- [23] ABDULLAH M R, PENG Z. Review and perspective on additive manufacturing of refractory high entropy alloys[J]. *Materials Today Advances*, 2024, 22:100497.
- [24] LIU S Y, DIXIT S, CHEN W Y, LI M M. Phase stability of precipitate-hardened CoCrFeNiTi high entropy alloys fabricated via laser-directed energy deposition under high-temperature irradiation[J]. *Materials Letters*, 2024, 376: 137309.
- [25] WANG F, YUAN T C, LI R D, LIN S Q, NIU P D, CRISTINO V. Effect of Mo on the morphology, microstructure and mechanical properties of $\text{NbTa}_{0.5}\text{TiMo}$, refractory high entropy alloy fabricated by laser powder bed fusion using elemental mixed powders[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, 111: 106107.
- [26] WU W, WANG H R, HU Y N, LU Y, SHE J T, REN X H. Plasma arc robot for direct wall high-entropy alloy additive manufacturing[J]. *Materials*, 2026, 19(2): 354.
- [27] ABEDIM, MOSKOVSKIKH D, ROMANOVSKI V, OZHERELKOV D, GROMOV A. Unlocking the potential of graphene-reinforced AlSi10Mg nanocomposites in laser powder bed fusion: A comprehensive review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 978: 173441.
- [28] REN J, ZHANG Y, ZHAO D X, CHEN Y, GUAN S, LIU Y F, LIU L, PENG S Y, KONG F Y, POPLAWSKY J D, GAO G H, VOISIN T, AN K, WANG Y M, XIE K Y, ZHU T, CHEN W. Strong yet ductile nanolamellar high-entropy alloys by additive manufacturing[J]. *Nature*, 2022, 608(7921): 62-68.
- [29] KIM Y S, OZASA R, SATO K, GOKCEKAYA O, NAKANO T. Design and development of a novel non-equiatomic Ti-Nb-Mo-Ta-W refractory high entropy alloy with a single-phase body-centered cubic structure[J]. *Scripta Materialia*, 2024, 252: 116260.
- [30] GOU S Y, GAO M Y, SHI Y Z, LI S C, FANG Y T, CHEN X H, CHEN H C, YIN W, LIU J B, LEI Z F, WANG H T. Additive manufacturing of ductile refractory high-entropy alloys via phase engineering[J]. *Acta Materialia*, 2023, 248: 118781.
- [31] WANG W, ZHANG Y B, ZHAO Y, XIAN J W, LU Y P, WANG T M, LI T J. High-entropy alloy reinforced Al-Si alloy with isotropically high strength processed by laser powder bed fusion[J]. *Materials*

- rials Science Engineering: A, 2025, 946: 149126.
- [32] KIM Y S, GOKCEKAYA O, SATO K, OZASA R, MATSUGAKI A, NAKANO T. In-situ alloying of nonequiatomic TiNbMoTaW refractory bio-high entropy alloy via laser powder bed fusion: Achieving suppressed microsegregation and texture formation[J]. Materials & Design, 2025, 252: 113824.
- [33] ZHANG B, MU W D, CAI Y. Design and preparation of gradient high-entropy alloy composite deposition layer by laser directed energy deposition[J]. Materials Letters, 2025, 388: 138292.
- [34] RON T, LEON A, POPOV V, STROKIN E, ELIEZER D, SHIRIZLY A, AGHION E. Synthesis of refractory high-entropy alloy WTaMoNbV by powder bed fusion process using mixed elemental alloying powder[J]. Materials, 2022, 15(12): 15.
- [35] ZHANG H, XU W, XU Y J, LU Z L, LI D C. The thermal-mechanical behavior of WTaMoNb high-entropy alloy via selective laser melting (SLM): Experiment and simulation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1-4): 461-474.
- [36] SONG M, MA B, HUANG H, LIU L, GUO R, YIN Y, WANG H, LI D, LI N, PAN J, LIU L. A novel $\text{Ni}_{40}\text{Co}_{18}\text{Cr}_{18}\text{Fe}_{14}\text{Al}_5\text{Ti}_5$ high entropy alloy with superior mechanical properties and broad printing window via selective laser melting[J]. Materials & Design, 2024, 239: 112754.
- [37] GAO H T, GUO Y X, WANG F P, ZHANG J, LIU Q B. Laser additively manufactured Al-bearing CoCrFeNi high-entropy alloys with across micro-nano scale laminated heterostructures driving from chemical interface engineering [J]. Manufacturing Process, 2025, 133: 1065-1078.
- [38] LI Y Z, ZHANG D Z, HU Y B, CONG W L. Laser-directed energy deposition of CoCrFeNiTi high entropy alloy coatings: Effects of powder geometry and laser power[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126: 3023-3038.
- [39] DE NARDI A, MOHAMMADZADEH A, MOSTAFAEI A, TORRALBA J M. Laser powder bed fusion of a novel CoNi-based high entropy superalloy[J]. Materials & Design, 2025, 259: 114741.
- [40] LIU Z Y, LIU J W, FAN X K, ZOU T, LIANG Z W. Effect of Cu content on microstructure and high-temperature oxidation behaviors of $\text{AlCu}_4\text{CoCrFeNi}_{21}$ high-entropy alloys manufactured by laser directed energy deposition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 34: 2101-2115.
- [41] RADHAKRISHNAN M, SHARMA S, PALANIAPPAN S, PANTAWANE M V, BANERJEE R, JOSHI S S, DAHOTRE N B. Influence of thermal conductivity on evolution of grain morphology during laser-based directed energy deposition of CoCrFeNi high entropy alloys[J]. Additive Manufacturing, 2024, 92: 104387.
- [42] LI Q Y, ZHANG H, LI D C, CHEN Z H, WANG F, WU M J. Comparative study of the microstructures and mechanical properties of laser metal deposited and vacuum arc melted refractory NbMoTa medium-entropy alloy[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020, 88: 105195.
- [43] ZHANG Y S, WANG H M, ZHU Y Y, ZHANG S Q, CHENG F, YANG J W, SU B, YANG C. High specific yield strength and superior ductility of a lightweight refractory high-entropy alloy prepared by laser additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2023, 77: 103813.
- [44] NAIZABEKOV A, SAMODUROVA M, BODROV E, LEZHNEV S, SAMOILOVA O, TROFIMOV E, MIKHAILOV D, LITVINIYUK K, TROFILOVA S, LATFULINA Y, PANIN E, PASHKEEV K. Use of laser cladding for the synthesis of coatings from high-entropy alloys reinforced with ceramic particles[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02541.
- [45] CHEN B, ZHAO Y, YANG H, ZHAO J J. Process parameters optimization and numerical simulation of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating via laser cladding[J]. Materials, 2024, 17(17): 4243.
- [46] ZHANG Y G, GAO X F, LIANG X B, CHONG K, WU D T, ZOU Y. Effect of laser remelting on the microstructure and corrosion property of the arc-sprayed AlFeNbNi coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 398: 126099.
- [47] LYU P, JIANG M X, XIA J, GUO S, LIU Y, LIU X L, LIU H X. Microstructural evolution and property enhancement of CoCrFeNi-Ta_x high-entropy alloys by laser remelting[J]. Intermetallics, 2026, 188: 109056.
- [48] DONG T S, LU P W, MA Q L, LI G L, LIU Q, FU B G, LI J K. Effect of laser remelting on high-temperature oxidation resistance of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 466: 129608.
- [49] 董天顺, 刘建辉, 马庆亮, 刘琦, 付彬国, 李国禄, 陆鹏伟. 激光重熔对等离子喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层组织和耐腐蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2024, 37(3): 125-133.
- DONG T S, LIU J H, MA Q L, LIU Q, FU B G, LI G L, LU P W. Effect of laser remelting on microstructure and corrosion resistance of plasma sprayed AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating [J]. China Surface Engineering, 2024, 37(3): 125-133.
- [50] 李邱达, 李嘉渊, 马登潘, 马凯, 李凌羽. 激光重熔合成 AlCo₂CrFeNiCu 高熵合金涂层组织与耐腐蚀性能[J]. 有色金属工程, 2023, 13(6): 31-38.
- LI Q D, LI J Y, MA D P, MA K, LI L Y. Microstructure and corrosion resistance of AlCo₂CrFeNiCu HEA coatings synthesized by laser remelting[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(6): 31-38.
- [51] HUA N B, WANG W J, WANG Q T, YE Y X, LIN S H, ZHANG L, GUO Q H, BRECHTL J, LIAW P K. Mechanical, corrosion, and wear properties of biomedical Ti-Zr-Nb-Ta-Mo high entropy alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 861: 157997.
- [52] LIU W H, JIANG K Y, YAN B G, LIU J, LU X Z, CAI Z H, CHEN Y J, MOU H L. Cable-stranded wire-fed laser cladding of high-aluminum lightweight high-entropy alloys[J]. Materials Today Communication, 2024, 39: 108835.
- [53] MA S B, ZHANG C Z, LI L, YANG Y H. Microstructure and properties of CoCrFeNiMnTi_x high-entropy alloy coated by laser cladding[J]. Coatings, 2024, 14(5): 620.
- [54] XIE F, ZHAI C S, ZHANG X, ZHANG X, JIANG S N, YANG M L, ZHENG H X. Enhanced high-temperature oxidation resistance of TC11 titanium alloys via laser cladding FeCoNiCrMoBSi high-entropy alloy coatings[J]. Materials Chemistry and Physics, 2025, 340: 130861.
- [55] 高玉龙, 马国梁, 高晓华, 崔洪芝. 激光熔覆 CoCrNiMnTi_x 高熵合金涂层组织及耐磨性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 351-

- 358, 70.
- GAO Y L, MA G L, GAO X H, CUI H Z. Microstructure and wear resistance of CoCrNiMnTi_x high-entropy alloy coating by laser cladding[J]. Surface Thchnology, 2022, 51(9): 351-358, 70.
- [56] ZHU Z X, LIU X B, LIU Y F, ZHANG S Y, MENG Y, ZHOU H B, ZHANG S H. Effects of Cu/Si on the microstructure and tribological properties of FeCoCrNi high entropy alloy coating by laser cladding[J]. Wear, 2023, 512: 204533.
- [57] SIDDIQUI A A, DUBEY A K. Study of surface properties in laser surface alloying of Al₁Cu_{0.5}FeNiTi high-entropy alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(10): 6761-6773.
- [58] WANG H, GOULD B, MOOREHEAD M, HADDAD M, COUET A, WOLFF S J. In situ X-ray and thermal imaging of refractory high entropy alloying during laser directed deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117363.
- [59] GOU S Y, LI S C, HU H L, FANG Y T, LIU J B, DONG W P, WANG H T. Surface hardening of CrCoFeNi high-entropy alloys via Al laser alloying[J]. Materials Research Letters, 2021, 9(10): 437-444.
- [60] LIANG Z K, CHEN X, WANG C X, WU J H, SUN T, FENG X M, SHEN Y F, HUANG G Q. AlCrCuFeNi₃ dual-phase high-entropy alloy manufactured by selective laser melting in situ alloying: Alloying degree, microstructure, and strength[J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27(1): 11.
- [61] NAM H, PARK C, MOON J, NA Y, KIM H, KANG N. Laser weldability of cast and rolled high-entropy alloys for cryogenic applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 742: 224-230.
- [62] LI J C, MENG X C, WAN L, HUANG Y X. Welding of high entropy alloys: Progresses, challenges and perspectives[J]. Journal of Manufacturing Process, 2021, 68: 293-331.
- [63] LI P, SUN H T, WANG S, HAO X H, DONG H G. Rotary friction welding of AlCoCrFeNi_{2.1} eutectic high entropy alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 814: 152322.
- [64] PALGUNA Y, KANNAN A R, SAIRAM K, SHANMUGAM N S, KORLA R. Microstructure and mechanical properties of wrought Al_{0.2}CoCrFeNiMo_{0.5} high entropy alloy using gas tungsten arc welding process[J]. Materials Letters, 2022, 317: 132109.
- [65] LIU J, WANG S B, WANG J F, SHI P Y, CUI J Y, SHU D, DU Z B, WANG W C, WANG D H, SUN B D. Laser beam weldability of TiZrHfNbTa high entropy alloy and dissimilar weldability to C103 refractory alloy[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 114: 106270.
- [66] CHEN L J, BOBZIN K, ZHOU Z, ZHAO L D, ÖTE M, KÖNIGSTEIN T, TAN Z, HE D Y. Wear behavior of HVOF-sprayed Al_{0.6}TiCrFeCoNi high entropy alloy coatings at different temperatures[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 215-222.
- [67] ADOMAKO N K, SHIN G, PARK N, PARK K, KIM J H. Laser dissimilar welding of CoCrFeMnNi-high entropy alloy and duplex stainless steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 85: 95-105.
- [68] OLIVEIRA J P, SHEN J J, ZENG Z, PARK J M, CHOI Y T, SCHELL N, MAAWAD E, ZHOU N, KIM H S. Dissimilar laser welding of a CoCrFeMnNi high entropy alloy to 316 stainless steel [J]. Scripta Materialia, 2022, 206: 114219.
- [69] SANG Y P, LI D, DENG W L. Electron beam weldability of TiZrNbTa refractory high-entropy alloy and TC4 titanium alloy [J]. Materials Today Communication, 2024, 38: 107890.
- [70] AFONSO D, LOPES J G, CHOI Y T, KIM R E, SCHELL N, ZHOU N, KIM H S, OLIVEIRA J P. Dissimilar laser welding of an as-rolled CoCrFeMnNi high entropy alloy to Inconel 718 superalloy[J]. Optics and Laser Technology, 2025, 180: 111427.
- [71] GU X Y, ZHANG L H. Laser lap welding of TC4 titanium alloy to 6082 aluminum alloy using a CoNiCuNb0.5V1.5 high entropy alloy filler[J]. Materials Letters, 2022, 312: 131562.
- [72] GHOLAMZADEH H, NIKNIAZI A, POURALIAKBAR H, JALALI A, DAUB K, AHN S Y, KIM H S, SHIM S H, HONG S I, BALOGH L, FALLAH V, PERSAUD S Y. Additive manufacturing-induced microstructural hierarchy alters dealloying behavior in CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2026, 1053: 186176.
- [73] ZHONG L L, SU C C, CHEN X Z, WANG Y, ZHOU M H, YANG Y M, WANG Y H. Strength-ductility synergy in AlCrFeNi eutectic high-entropy alloy via wire-powder arc additive manufacturing[J]. Materials Letters, 2026, 414: 140543.
- [74] REN C C, ZHANG X R, CAI X H, WANG D, YANG X S, ZHAO X C, LI J F. Effect of carbides on the mechanical properties of laser additive manufacturing CrMnFeCoNi high entropy alloy[J]. Intermetallics, 2026, 192: 109232.
- [75] TIAN Y, LU D, WANG W Q, LU Y Z, NARAYAN R L. Combining strain-assisted nanoprecipitation with nanotwins to enhance strength of laser additively manufactured high-entropy alloys [J]. Materials Characterization, 2026, 234: 116192.
- [76] LIU J H, YIN Y Z, GAO J H, LUO X, OUYANG D, LIU W F, YAO J H, LIU L, PAN J. Additive-manufactured nanoscale lamellar architecture enables enhanced dynamic damage resistance in an AlCoCrFeNi_{2.1} eutectic high-entropy alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2026, 271: 259-268.
- [77] KAREEM S A, OLANREWAJU O F, ANAELE J U, OGEDENGBE, II, ERINLE T J, OLAYIWOLA M A, CHINEDU C C, OKE S R, BODUNRIN M, MALEDI N. Additive manufacturing of high entropy alloys via selective laser melting: a nascent review on defects mitigation, microstructural evolution, mechanical and other functional properties[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2026, 142(5-6): 2051-2100.
- [78] SUN G F, SHEN X T, WANG Z D, ZHAN M J, YAO S, ZHOU R, NI Z H. Laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel: Influence of feeding powder compositions on microstructure and mechanical properties[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 109: 71-83.
- [79] PENG Y B, ZHANG W, LI T C, ZHANG M Y, WANG L, SONG Y, HU S H, HU Y. Microstructures and mechanical properties of FeCoCrNi high entropy alloy/WC reinforcing particles composite coatings prepared by laser cladding and plasma cladding[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 84: 105044.
- [80] KAFALI M, DOLEKER K M, ERDOGAN A, SUNBUL S E, ICIN

- K, YILDIZ A, GOK M S. Wear, corrosion and oxidation characteristics of consolidated and laser remelted high entropy alloys manufactured via powder metallurgy[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 467: 129704.
- [81] LI S, YAMAGUCHI T. High-temperature oxidation performance of laser-cladded amorphous TiNiSiCrCoAl high-entropy alloy coating on Ti-6Al-4V surface[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 433: 128123.
- [82] TALBOT A, SHANG X, WANG W D, CHENG C J, LYU T, ZOU Y. Laser remelting of a CrMnFeCoNi high-entropy alloy: Effect of energy density on elemental segregation[J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27(18): 15.
- [83] ZHANG S Y, HAN B, LI M Y, ZHANG Q, HU C Y, JIA C X, LI Y, WANG Y. Microstructure and high temperature erosion behavior of laser cladded CoCrFeNiSi high entropy alloy coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 417: 127218.
- [84] ZHU J, ZHANG Y, XU M M, HUI X D, ZHAO S H, WU Y L, ZHENG H Y, ZHAO Y, WANG X M, WANG Z K, YU J M, XU Y, ZHU S. Manufacturing strategies, microstructures and mechanical properties of CoCrFeNiMo_{0.5} high entropy alloys prepared by laser powders directed energy deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177360.
- [85] TONG Z P, LIU H L, JIAO J F, ZHOU W F, YANG Y, REN X D. Laser additive manufacturing of CrMnFeCoNi high entropy alloy: Microstructural evolution, high-temperature oxidation behavior and mechanism[J]. Optics and Laser Technology, 2020, 130:106326.
- [86] LIU A M, AN Z, WANG B, QIAO H L, CHANG K M, FAN Y. The laser welding research of dissimilar materials between Al-CoCrFeNi_{2.1} Eutectic high-entropy alloy and GH3030 nickel-based alloy[J]. Materials, 2025, 18(21): 4970.

(责任编辑:李亚敏)