引用格式：董世运，孙哲，秦璐，等．激光熔覆工艺创新发展及其在材料创制中的应用[J]．材料工程，2026，54(8)：69-90.
DONG Shiyun，SUN Zhe，QIN Lu，et al.Novel progress of laser cladding and its applications in material fabrication[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：69-90.

激光熔覆工艺创新发展及其在材料创制中的应用

董世运[1*]，孙　哲[1]，秦　璐[1,2]，闫世兴[1]
（1 陆军兵种大学 再制造技术全国重点实验室，北京 100072；2 山东科技大学 机电学院，山东 青岛 266590）

摘要：激光熔覆利用高能激光将熔覆材料与基体表层快速熔化并凝固为冶金结合涂层，是金属零件表面高性能涂层制备和再制造修复的先进技术手段。近年来，激光熔覆技术已从最初的表面涂层制备技术，发展为集高性能涂层制备、损伤件再制造修复及增材制造于一体的综合性材料加工技术，并在新材料研发与高性能涂层制备方面展现出巨大的发展潜力。本文在系统阐述激光熔覆过程冶金特点的基础上，重点综述了激光熔覆工艺的创新发展，涵盖高效化、复合化、专用化及智能化四个主要方向。在此基础上，本文聚焦于激光熔覆在材料创制中的功能与应用，系统梳理了其在传统合金体系、高熵合金、非晶合金、金属基复合材料及功能梯度材料等领域的制备与性能调控研究进展，归纳了各类材料的强化机制与典型应用场景。基于激光熔覆的材料创制仍面临突出挑战，主要包括非平衡凝固理论不完善、工艺-组织-性能定量模型缺失、过程监控与性能评价技术不足。展望未来，该领域应着力推进工艺数智化、新材料体系创新、极端环境适配、多能场复合与工艺链集成等方向发展。

关键词：激光熔覆；材料创制；高熵合金；非晶合金；金属基复合材料；功能梯度材料
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2026.000281　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2026.000281
中图分类号：TG174.4；TG665　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)08-0069-22

Novel progress of laser cladding and its applications in material fabrication

DONG Shiyun[1*]，SUN Zhe[1]，QIN Lu[1,2]，YAN Shixing[1]
（1 National Key Lab for Remanufacturing，Army Arms University of PLA，Beijing 100072，China；2 College of Mechanical and Electrical Engineering，Shandong University of Science and Technology，Qingdao 266590，Shandong，China）

Abstract：Laser cladding uses a high-energy laser to rapidly melt cladding materials with the substrate surface，forming a metallurgically bonded coating upon solidification. It is a key technology for producing high-performance surface coatings and remanufacturing metallic components. Recently，laser cladding has evolved from a surface coating technique into a comprehensive process integrating coating fabrication，repair of damaged parts，and additive manufacturing，showing great potential in new material development. This review first elaborates the metallurgical characteristics of laser cladding metals，then highlights process innovations in four directions：high efficiency，hybridization，specialization，and intellectualization. It further addresses the role of laser cladding in material development and fabrication，systematically reviewing research progress on conventional alloys，high-entropy alloys，amorphous alloys，metal matrix composites，and functionally graded materials，and summarizing their strengthening mechanisms and typical applications. However，challenges remain for laser cladding fabricating materials，including incomplete non-equilibrium solidification theories，lack of quantitative process-microstructure-property models，and inadequate monitoring and evaluation techniques. Future efforts should prioritize data-driven intelligent optimization，novel material system design，extreme-environment adaptability，and integration of multi-energy-field hybrid processes and combined process chains.

Key words：laser cladding；material fabrication；high-entropy alloy；amorphous alloy；metal matrix composite；functionally graded material

激光熔覆利用高能激光将熔覆材料与基体表层快速熔化，并快速凝固为与基体呈冶金结合的涂层，是金属零件表面高性能涂层制备和局部损伤部位再制造修复的先进技术手段。激光熔覆技术通过在零部件表面制备高性能涂层，可以显著改善基体材料表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化等性能，并实现降低材料成本、节约贵重稀有金属材料的目的。它具有工艺柔性好、适用材料体系广泛、熔覆层组织致密和性能优异等技术优势[1-4]。近年来，激光熔覆技术研究不断深化、应用快速发展，已从最初的作为制备“二维”表面涂层的表面工程技术，发展为修复零件局部“二维”表面损伤和“三维”体积损伤的再制造修复技术，进而发展为“三维”立体成形的激光增材制造技术。目前，激光熔覆技术已在多领域广泛应用于高性能涂层制备、损伤件再制造修复及新零件增材制造。

在激光熔覆技术发展历程中，熔覆材料一直是被关注的技术重点之一。熔覆材料是激光熔覆层性能的决定性因素。早期阶段，人们主要从热喷涂材料、堆焊材料等已有材料中优选熔覆材料，但往往由于材料-工艺匹配不佳，导致熔覆层缺陷难以控制而使得材料性能和技术优势不能充分体现；随着研究和应用的深入，研究人员和行业逐步重视自主创新研发具有良好激光工艺性和熔覆层具有特定设计性能的熔覆材料[2-5]。可以看出，这些前期研究主要是以“用好”激光熔覆技术为目的。近年来，随着激光熔覆技术应用发展及工业界对高性能新材料需求的增强，针对新材料成分设计优化及性能评价所需的样品样件的制备与验证，激光熔覆技术体现出了其工艺适应性强、成分便于调控、制备流程短、绿色高效等独特的技术优势。针对传统工艺制备较困难的块体状材料及制造成本高的非晶合金[6-11]、高熵合金(high-entropy alloys，HEAs)[12-17]及金属基复合材料(metal matrix composites，MMCs)[13,18-21]等新材料，激光熔覆技术凭借激光束高能量密度、快速熔化、非平衡凝固及成分便于调控等技术特点，与铸造和锻造等传统工艺相比，具有明显的工艺优势。激光熔覆已成为研发和制备新材料的重要技术手段。

综上可见，激光熔覆技术在新材料创制方面具有巨大发展潜力。本文在介绍激光熔覆冶金特点、梳理激光熔覆技术工艺和熔覆材料发展的基础上，探讨激光熔覆在材料创制方面的功能作用、应用现状及发展前景。

1 激光熔覆过程的冶金特点

激光熔覆过程涉及光、热、力、流等复杂的冶金物理与化学过程，如图1所示[22]。关于激光熔覆中熔池冶金特点，国内外众多学者已开展了大量研究，明确了激光熔覆熔池温度场和流场演化规律及其熔体冶金凝固规律。激光熔池熔体冶金特点与其工艺过程中的热循环密切相关，可概括为以下四点：(1)局部“快热速冷”。激光束作为高能量密度热源(能量密度10^4～10^6 W/cm^2)作用于微小区域(光斑直径一般在

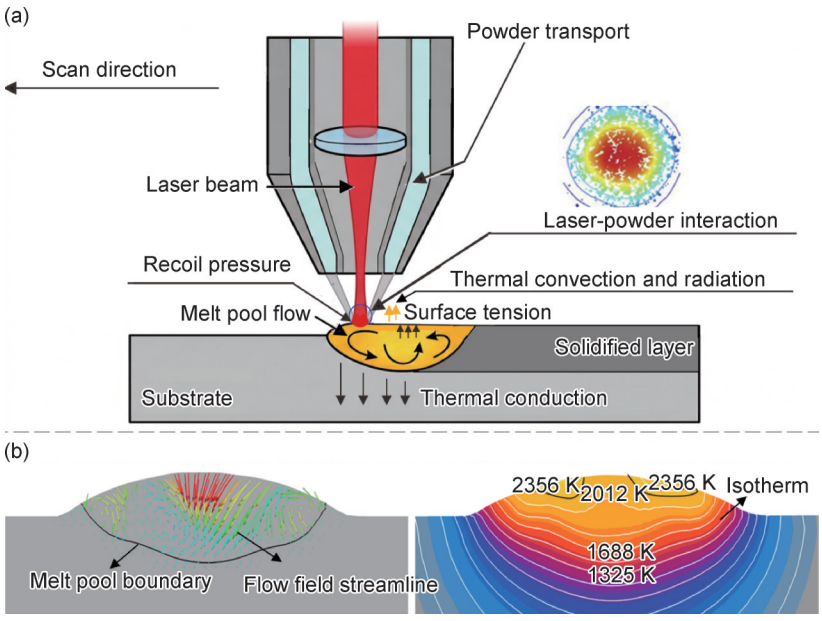


图1 激光熔覆工艺物理过程示意图

(a)光-粉-熔池交互过程；(b)熔池瞬时温度场和流场[22]

Fig.1 Schematic of the physical processes in a laser cladding process

(a)laser-powder particle-melt pool interaction；(b)temperature field and flow field of melt pool[22]

0.5～4 mm之间），能在极短时间内将材料加热至熔化，形成瞬时高温熔池；当激光束移开后，由于基体金属的快速导热，熔池即以高达10^3～10^6 K/s的冷却速率快速冷却凝固，较大的冷却速率使得晶粒得到细化，沉积态组织呈现晶粒细小的非平衡态快速凝固特征。(2)熔池内部存在极大的温度梯度。激光熔覆熔池的温度梯度可达10^6 K/m，但熔池内部不同位置温度梯度大小存在显著差异，熔池前缘温度梯度大、后缘温度梯度小，在多道搭接和多层堆积熔覆过程中初期熔覆熔池温度梯度大于后续熔池温度梯度。这也导致熔覆层不同部位的组织形态不同。(3)反复加热-冷却的热循环。在进行多道搭接或多层堆积时，后续熔覆层会对已经凝固的相邻区域或下层区域进行“二次加热”，使熔覆层经历复杂的热历史。反复的热循环相当于对熔覆层已凝固材料进行多次“原位热处理”，可诱发已凝固合金固态相变及残余应力变化。(4)显著的热积累。随着激光熔覆过程进行，输入到基体中的热量不断累积，导致后续熔覆层的初始温度（层间温度）逐渐升高，从而改变后续熔池的冷却条件。

激光熔覆熔池在多种驱动力共同作用下，会产生剧烈流动[23-25]。熔池表面温度梯度引起其表面张力梯度，进而驱动熔池熔体流动，称为马兰戈尼对流。研究发现，材料的化学成分会显著改变熔池表面张力系数及其随温度的变化率，进而直接影响马兰戈尼对流的方向和强度。大多数合金表面张力系数随温度的升高而降低（$\partial\sigma/\partial T<0$），熔池表面张力中心低、边缘高，熔体从中心向边缘流动；如果熔池中含有较高浓度的硫、氧或添加了某些稀土元素，表面张力系数随温度升高而升高（$\partial\sigma/\partial T>0$），会导致马兰戈尼对流方向发生反转，熔体从边缘向中心汇聚并向下流动。重力促使熔池金属向下沉降，而浮力则由熔池内部的温度差引起的密度变化产生，两者共同影响熔池内物质的上下运动。当激光功率较高、熔池局部温度峰值超过金属汽化温度时，表面产生剧烈的蒸发，蒸气逸出时会对熔池表面产生反冲压力。此外，同步送入的合金粉末或焊丝熔滴也会以一定的速度冲击熔池，对局部流动产生扰动。熔池的流动行为会显著改变熔池凝固前沿的温度场和溶质场，从而影响晶粒的形核、长大以及最终的微观组织。较强的熔池对流会产生剧烈的搅拌作用，能够破碎正在长大的枝晶，枝晶碎片可以作为新的晶核，促进细晶和等轴晶的形成。强烈的熔池流动会促进熔体成分混合，使各元素在熔覆层各区域分布更加均匀，降低宏观偏析。对于含有增强相颗粒的熔池，熔池流动产生的拖曳力能够有效克服颗粒的重力和团聚力，促进颗粒均匀弥散分布[26]。

激光熔覆的稀释率通常较低，一般可控制在5%～10%，甚至＜5%（堆焊工艺的稀释率一般在15%～30%之间），低稀释率能够最大程度保留熔覆材料设计成分，确保熔覆层具有设计性能。

正是基于上述“快热快冷”的动态微熔池冶金特点，激光熔覆可以制备出稀释率低、组织晶粒细小、与基体冶金结合的高性能涂层，实现对金属零件高性能制造或再制造修复，但同时也造成激光熔覆效率低且易导致残余应力大、产生气孔和裂纹缺陷等熔覆层质量问题，使得熔覆层质量控制和熔覆效率提升成为激光熔覆技术发展与应用中需要克服的技术难题。

2　激光熔覆工艺的创新发展

随着激光熔覆技术应用拓展，为满足更高效率、更高质量的需求，激光熔覆工艺不断创新发展。近年来，激光熔覆技术在提升效率、提高质量和性能、降低成本等多方面获得了创新发展，向着高效化、复合化、专用化、智能化方向发展。

2.1　工艺高效化

传统激光熔覆的熔覆速度较低（一般为0.3～2.0 m/min），导致其生产效率低、工艺成本高、应用受限。为此，近十余年来，在企业降本增效压力驱动下，国内外多家单位不断探索高效激光熔覆工艺方法，相关研究主要围绕提高熔覆速率（沉积效率）和提高材料利用率等方面展开。为此，研发出了高速/超高速激光熔覆、宽带激光熔覆、多光束激光熔覆、光内送粉激光熔覆和熔丝激光熔覆等新工艺。

超高速激光熔覆（extreme high speed laser cladding，EHLC）是近年来最具革命性的工艺方法之一[27-31]，该工艺通过特殊的光路和送粉喷嘴设计，将激光束的焦点调整到基体上方，大部分激光能量直接作用于粉末束流，使粉末在进入熔池前呈熔融或半熔融状态，高温液滴落在基体上，与基体极薄的表层（浅熔池）发生快速冶金结合[27]。由于激光能量主要集中在粉末上，基体的热输入极小，熔池和热影响区非常浅，有效降低了稀释率，并避免了薄壁或精密零件的热变形；熔池具有极高的冷却速率（可达10^6 K/s），熔覆层会形成极其细小、致密的微观组织（如超细枝晶甚至非晶相），熔覆层更薄、更均匀、表面粗糙度更低，加工余量较小。该技术可将熔覆速度提升至常规激光熔覆技术的10～100倍，扫描速率可达20～200 m/min。凭借在工艺效率和涂层质量方面的优势，超高速激光熔覆工艺正成为替代传统电镀和热喷涂的环保新选择。目前，超高速激光熔覆的设备研发、专用材料体

系开发及在大型构件上应用已成为研究热点之一。

在提高材料利用率方面，研究工作主要聚焦在优化激光束-粉束流-熔池之间的耦合行为[32-35]。常规的激光熔覆送粉方式为光外送粉，又可分为侧向送粉和光外同轴送粉。光外送粉熔覆头结构相对简单，粉末在光外输送过程中容易发散，部分粉末无法被精准送入熔池，降低了粉末材料利用率和熔覆效率。为提高粉末利用率，国内江苏大学等单位研发出了光内送粉激光熔覆工艺[36-40]，采用环形激光束作为热源，粉末从激光束中空区域送入熔池。垂直的送粉路径使得粉流更加稳定，粉末能够精准、集中地输送到熔池中。几乎所有的粉末颗粒都能够通过激光能量场，在进入熔池前被加热至熔化或呈熔融状态，提高粉末被熔池捕获效率，进而提高粉末利用率和熔覆效率。

2.2 工艺复合化

激光熔覆复合工艺本质上是为了突破传统激光熔覆在“快热速冷”过程中易出现的热应力、气孔、裂纹、成分偏析等缺陷，通过复合其他工艺或引入外物理场（热场、电磁场、声场、机械能场等）进行协同作用，以提高熔覆层质量。图2[41-44]给出了近年来发展起来的几种典型激光熔覆复合工艺的技术原理简图，表1总结介绍了其技术原理及优缺点[41-55]。

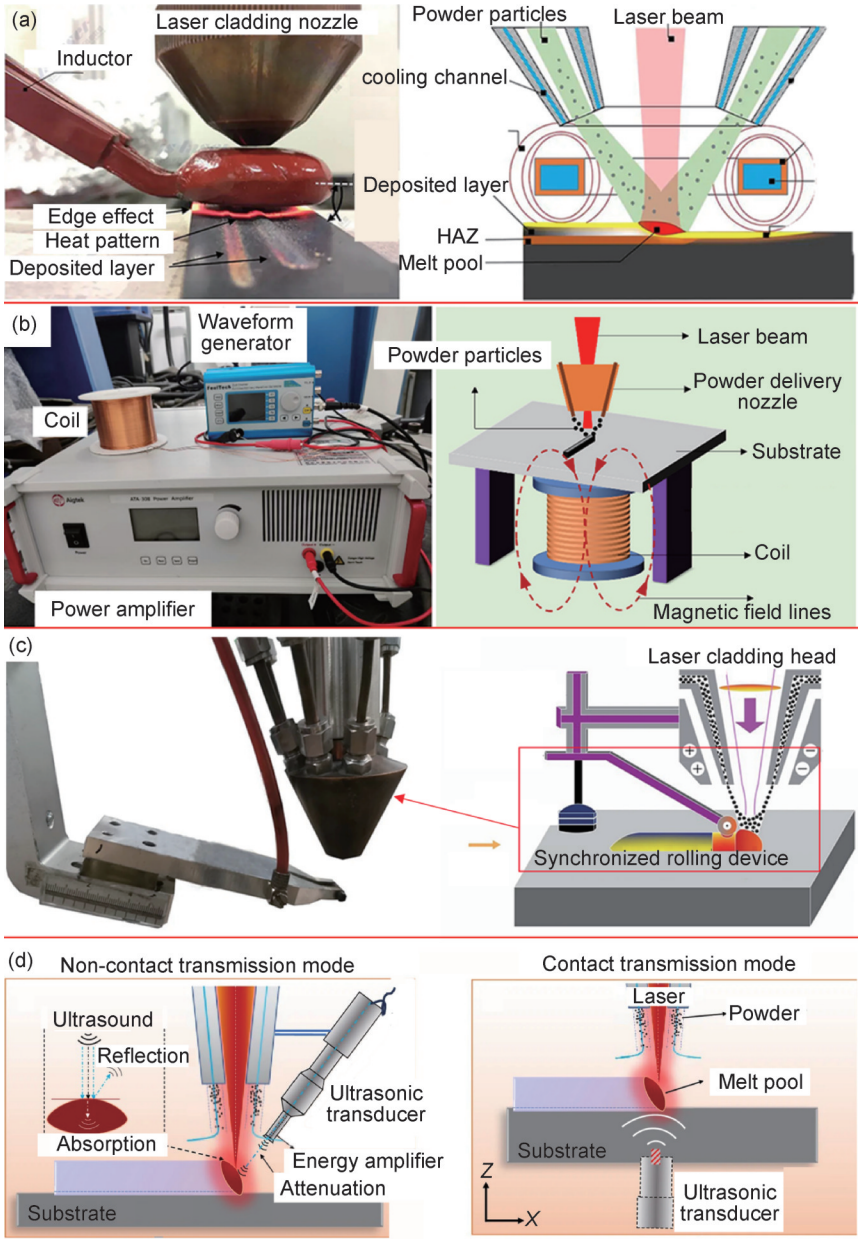


图2 激光熔覆复合工艺示意图

(a)感应加热复合[41]；(b)磁场复合[42]；(c)同步机械滚压复合[43]；(d)超声振动复合[44]

Fig.2 Illustration of field assisted laser cladding processes

(a)induction heating[41]; (b)magnetic[42]; (c)mechanical rollling[43]; (d)ultrasonic[44]

表 1　典型激光熔覆复合工艺的技术原理及优缺点[45-55]

Table 1　Mechanism, advantages and disadvantages of field-assisted laser cladding processes[45-55]

Types of assisting field	Principle	Advantage	Limitation
Thermal	Preheating or induction heating is employed to reduce thermal gradients and cooling rate	Cracking reduction, improved bonding, lower critical cooling rate	Substrate softening, increased heat affected zone, higher energy consumption
Magnetic	Lorentz force induced convection stirs melt pool	Grain refinement, reduced segregation/porosity, controlled particle distribution	Complex field optimization, limited to conductive materials
Acoustic	Cavitation and acoustic streaming are activated to promote nucleation and facilitate degassing	Significant grain refinement, porosity reduction, improved particle dispersion	Energy attenuation, sonotrode wear, surface rippling risk
Mechanical (contact)	Rolling/burnishing induce plastic deformation and compressive stress	Residual compressive stress, densification, combined finishing, micro pore/crack elimination	High contact load, tool wear, limited to simple geometries
Mechanical (non-contact)	Non-contact shock wave-induced deformation	No tool wear, residual stress reduction, densification, micro pore/crack elimination	Precise timing required, limited shock effect

“激光熔覆＋热场”是在激光熔覆工艺中引入额外热源辅助调控温度场，以优化熔池凝固、固态相变和残余应力[46-48]。辅助热场的引入方式包括基板预热和保温、感应加热、激光重熔等，其中激光重熔工艺可使已凝固的熔覆层重新熔化和快速凝固，显著提高表面质量、细化晶粒、减少或消除熔覆层内部的孔隙和微裂纹。“激光熔覆＋电磁场”是在激光熔覆过程中，对熔池施加电磁搅拌来调控熔池的对流状态，从而均匀化成分分布，减少元素偏析，电磁搅拌作用能够破碎正在长大的粗大枝晶，促进细晶和等轴晶的形成[49-52]。“激光熔覆＋声场”，即在熔覆过程中同步对熔池施加高频振动，通过声流与空化效应，促进晶粒细化和成分均匀化[51-52]。辅助声场的施加方式主要包括从基体底部导入（固定接触式）、从熔池上方通过气动耦合进行能量传递（非接触式）及将超声工具头与熔覆层或熔池相接（同步移动接触式）三种方式。“激光熔覆＋机械能场”，即在激光熔覆过程中或熔覆层凝固后，利用熔覆层尚处于高温、具有良好塑性的时机，对其进行滚压、冲击或锻打，通过物理挤压，直接闭合涂层内部的气孔和微裂纹，提高熔覆层致密度，在熔覆层中产生残余压应力，提升其疲劳寿命；同时，滚压/锻打带来的塑性变形会引发加工硬化效应，显著提升涂层表面硬度[53]。机械能场的施加方式主要是接触式，即工具头直接作用于工件加工区域。近年来，借助脉冲激光冲击作为辅助手段的双光束激光熔锻工艺方法正在成为研究的热点[54-55]，该工艺方法利用脉冲激光冲击熔池后方的高温固相区域，具有细化晶粒、调控应力、减少缺陷等技术优势，从而提升熔覆层疲劳性能等力学性能。

大量研究和应用实践表明，复合工艺显著提升了激光熔覆层的质量和性能，拓展了激光熔覆技术在高端装备制造和再制造修复中的应用。

2.3　工艺专用化

传统激光熔覆一般针对激光束可以辐照到的零件外表面特定部位进行作业，其加工区域往往是平面或柱面等简单结构形状。针对外表面结构规则零件的熔覆，可采用标准激光头与三轴联动行动机构组成熔覆系统，此类工艺成熟、效率高，已得到了大量应用。为适应不同工业应用场景下零件结构与空间约束条件的苛刻要求，激光熔覆技术已从通用型外表面加工，逐步发展出多种专用化激光熔覆工艺（如内孔激光熔覆等），以实现更复杂零件的精准修复与强化制造。

（1）内孔与管道内壁熔覆。内孔、管道、阀座等零件内部表面长期承受摩擦和腐蚀，但是内部空间狭窄，传统激光熔覆头难以伸入。针对阀门、缸体、管道内腔等受限空间，研究人员研发了小型化、长焦距的激光内孔熔覆头（含反射/折射光学组件），配合工件旋转或激光头旋转机构，实现了深孔、变径管内壁的连续熔覆。图 3 为内孔/壁激光熔覆工艺原理图[56-57]。

（2）复杂曲面的随形熔覆。复杂曲面或异形不规则零件（如叶片、曲轴、模具型腔等）的激光熔覆，需要激光头与加工表面保持稳定的相对位置（垂直或保持特定角度）和距离，以获得恒定的光斑尺寸，确保熔覆质量的一致性，这对熔覆系统中移动机构的柔性和路径规划的适应性提出了更高的要求。依托六轴工业机器人或五轴联动数控机床，结合离线编程与激光头姿态实时调控，实现激光束与曲面法向的相对位姿保持，即“随形熔覆”[58-59]。图 4 所示为零件曲面激光熔覆工艺实施过程原理图，通过多轴机器人控制熔覆头移动路径，可实现高柔性熔覆成形。

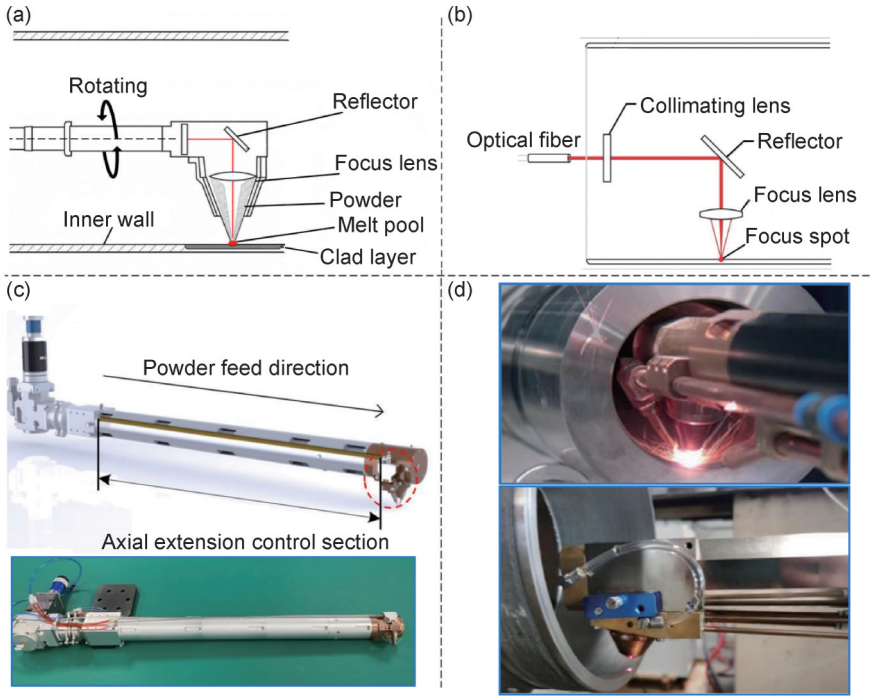


图3 内孔/壁激光熔覆工艺

(a)原理图;(b)激光传输原理示意图;(c)一种内孔激光熔覆头[56];(d)内孔/壁激光熔覆工艺实施过程[56-57]

Fig.3 Cladding process of laser inner wall

(a)process principle;(b)laser transmission path;(c)an inner wall cladding head[56];(d)laser inner wall cladding process[56-57]

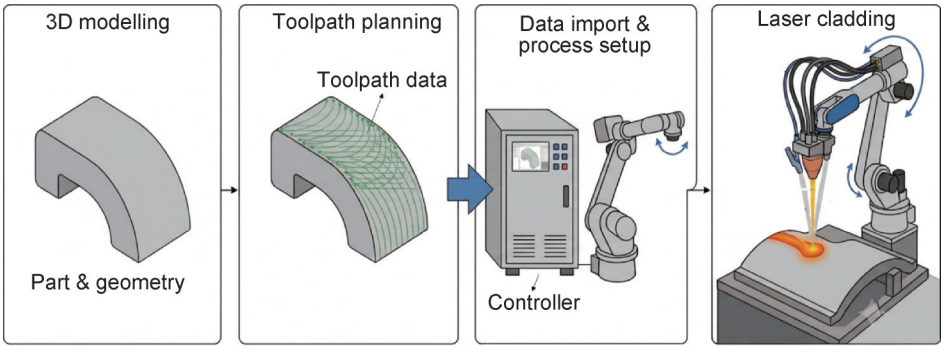


图4 零件曲面激光“随形熔覆”工艺过程原理图

Fig.4 Schematic of “conformal laser cladding” process on curved surface

工艺专用化增加了激光熔覆的作业空间适应性和基体形状适应性,使原本仅适用于规则外表面的应用场景拓展至内腔、缸体、叶片等复杂结构与空间约束场景。专用化进程是实现激光熔覆工艺从实验环境到工业环境工程化转化的关键支撑。此外,针对无法拆卸或移动的大型装备(如轧辊、船舶轴系、风力发电机主轴、装备损伤零部件等),开发了高度集成的模块化激光熔覆设备,配合移动式机器人、轨道行走机构或移动方舱系统,实现了现场原位修复或性能强化[60-61]。

2.4 工艺智能化

激光熔覆工艺优化是在材料(熔覆材料和基体材料)、激光设备系统(涉及激光束、送粉束流、保护气等)和待熔覆零件(形状结构与性能要求)协同匹配情况下,获得多工艺参数和扫描路径的优化组合。在新材料、新场景激光熔覆工艺优化中,传统的“试错法”实验研究范式存在研发周期较长、成本较高等不足之处,正在向基于数据和智能算法的精准预测与调控模式转变。多年来,研究人员不断探索激光熔覆工艺过程的数值模拟计算,通过模拟熔池动力学、温度场、应力场及微观组织演化,期望在数值模拟的辅助下,大幅缩小工艺实验范围、缩短工艺优化周期,更加高效地获得最佳工艺窗口。随着研究人员对激光熔覆过程的深化理解和模拟计算技术发展,通过多尺度多物

理场耦合模拟计算，已可以获得特定需求的激光熔覆工艺方案。同时，随着人工智能与机器学习（智能工艺控制）技术发展，AI赋能的激光熔覆已成为激光熔覆技术的重要发展方向，这也被认为是解决工艺优化复杂性的根本出路。结合人工智能（AI）与机器学习，通过构建“工艺参数-熔池特征-组织性能”的智能预测模型，有望实现工艺的实时反馈控制和自主优化；结合数字孪生技术，可实现对激光熔覆过程的动态精准调控[62-65]。“AI+激光熔覆”研发新范式，在不久的未来将取代传统试错法，实现激光熔覆工艺的智能优化与在线反馈控制，推进智能激光熔覆技术发展，助力激光熔覆成为智能制造/再制造和新材料研制的先进技术手段。

激光熔覆工艺的创新发展，为激光熔覆技术在定制化高性能制造、新材料研发等方面应用发展提供了先进手段支撑。

3　激光熔覆在材料创制中的功能与应用

材料创制是指通过主动设计材料的化学成分和制备工艺，来获得具有特定功能和性能的新材料，是一个以需求为导向，对材料从微观结构到宏观性能进行全方位设计、制备与优化的系统性工程。激光熔覆凭借高能激光可熔化任何材料、熔覆材料成分可灵活组合并实时调整、激光工艺柔性好、自动化程度高，可以制造出具有全新成分、结构和性能的新材料，在材料创制中体现出显著优势和巨大潜力。激光熔覆在材料创制方面不仅仅是单一的制备技术，而是提供了一个基于远离平衡态快速凝固条件的“材料创制平台”，为创制其他冶金工艺难以获得的新型微观组织提供了独特的热力学与动力学条件。

激光熔覆在材料创制方面的核心功能和应用可以概括为以下几个方向。(1)新品零件表面强化。激光熔覆技术可以使成本相对较低的材料基体获得高成本材料具备的优异表面性能，使零件具有更好的综合性能。在金属基体表面制备高性能涂层，能够在不改变基体材料力学性能的前提下，显著提升其表面的耐磨、耐蚀、耐高温及抗氧化等性能。(2)损伤零件再制造和高性能修复。激光熔覆技术可精准修复因磨损、腐蚀或疲劳而导致失效的零部件，恢复其原始尺寸精度和性能；通过熔覆具有更优性能的材料，能够提升零件服役性能和延长服役寿命。(3)增材制造零件。基于激光熔覆原理的激光定向能量沉积技术，作为金属激光增材制造工艺方法和高端制造技术手段之一，已广泛应用于创新设计新型零件快速制造和小批量零件直接制造。(4)新材料研发制备。图5概括了激光熔覆技术材料创制的功能功用和典型应用领域。

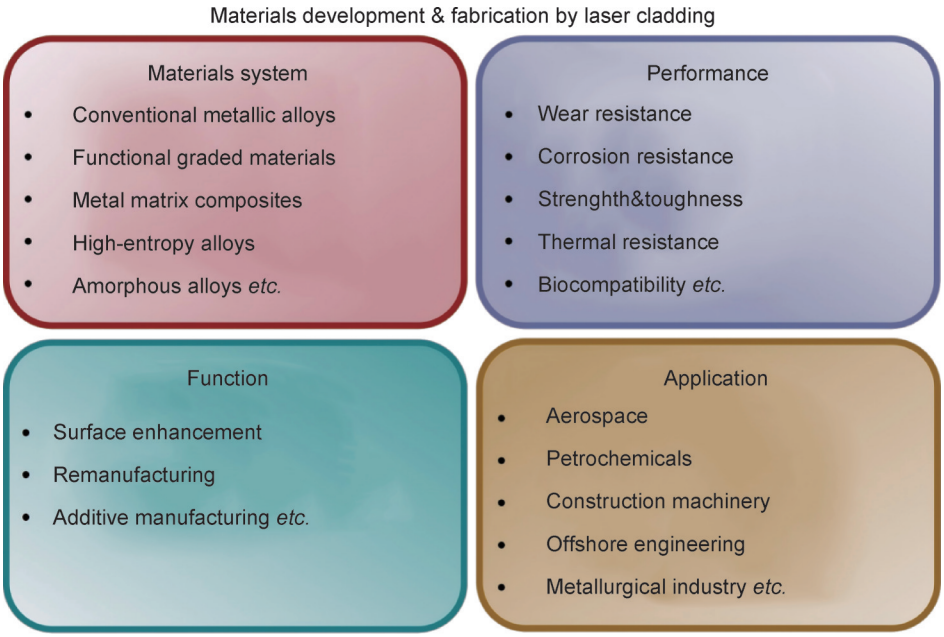


图5　激光熔覆在材料创制中的功用及应用

Fig.5　Functions and applications of laser cladding for material development and fabrication

激光熔覆技术及基于激光熔覆原理的激光增材制造技术已成为材料创制的重要技术手段，其功能与应用主要体现在传统合金体系、新型合金及非稳态合金、MMCs、功能梯度材料（functional gradient mate-

rial,FGM)及极端性能材料的设计及制备等方面。

3.1 传统合金体系

激光熔覆传统合金涂层材料体系包括Fe基、Ni基、Co基、Ti基、Cu基、Al基等,这些体系目前覆盖了工业领域大量金属零件的表面强化与修复需求,凭借各自独特的理化及力学性能,适用于不同的服役环境和工况条件。Fe基合金涂层成本低、与钢基体相容性好,已被广泛应用于钢铁件表面强化和再制造修复[66-68],典型成分体系包括Fe-Cr-B-Si、Fe-Cr-Ni-B-Si等;Ni基合金耐高温氧化、耐腐蚀、综合性能优异,代表性合金体系为Ni-B-Si、Ni-Cr-B-Si等,被广泛应用于提升零件的表面耐热疲劳及耐腐蚀性能[68-71];Co基合金高温耐磨性好,且具有优异的热稳定性,代表性的成分体系有Stellite系列、Tribaloy系列等,常用于高温磨损部件的表面处理[69,72-74]。Ti基合金涂层具有高比强度、生物相容性好等特点,主要用于提升Ti合金基体的耐磨性和耐高温性能,常通过添加TiN、WC、B_4C等增强相提升涂层性能;Cu基合金导热/导电性能优异,但Cu合金的高导热性及对激光的高反射带来了工艺上的挑战,常用于结晶器铜板、电磁导轨等对表面导电或导热有要求的零部件表面强化;Al基合金轻质、耐蚀性好,常用于Al合金零件的再制造或表面强化。

在进行激光熔覆材料创制时,应突破传统平衡凝固的思维,遵循不同于铸造或锻造工艺的非平衡冶金设计原则,使材料本征特性与激光能量密度高、快冷速热、多重热循环的工艺特性协同作用,以获得涂层的目标性能。作者团队针对装备高强钢零部件应急修复的需求,设计开发了激光熔覆工艺适配的FeCrNiMo系合金粉体材料,通过成分设计调控马氏体相变开始温度,使材料具有较低固态相变点,并利用激光熔覆工艺的热应力诱发马氏体相变,通过相变过程中伴随的4%左右体积膨胀效应部分抵消激光熔覆层合金冷却收缩产生的拉应力,得到了“以相变应力抵消热应力”的主动应力调控效果,使熔覆层在免预热条件下具有优异的抗裂性和力学性能,可满足野外环境下高强钢关重件的高质效修复[75-76]。针对铸铁(如HT250、HT500)零件修复中“白口”组织和CO气孔抑制等质量控制难题,作者团队基于“促石墨化、预合金化、熔池净化”等激光熔覆粉体材料设计策略,研发了NiCuFeBSi系激光熔覆修复用合金粉末,在免预热条件下实现了铸铁件表面激光熔覆层的无缺陷成形(厚度>10 mm),已应用于重型柴油机缸体和缸盖等铸铁件的激光熔覆修复[77-78]。

传统合金涂层的性能往往受限于材料本征特性与工艺约束,难以满足日益严苛的工况需求。近年来,研究人员利用激光熔覆技术实现了新型合金及非稳态合金涂层材料的研发制备,提升了涂层性能,以适应更苛刻的服役环境和性能要求。

3.2 新型合金与非稳态合金

激光熔覆凭借其工艺特性,在新型合金和非稳态材料创制方面具有技术优势,成功制备了包括HEAs、非晶、准晶、纳米晶、金属间化合物、过饱和固溶体等,在超高硬度与耐磨性、耐蚀性、耐高温与抗氧化性等方面突破了传统合金体系的性能瓶颈,在极端工况下展现了巨大的应用潜力。其中,高熵合金和非晶合金是近年来研究广泛的两类新材料。

3.2.1 高熵合金

高熵合金(HEAs)是至少有5种主要元素以等原子比或近等原子比混合而成(每种元素的原子分数在5%到35%之间),基体为简单固溶体相的合金体系。HEAs的成分设计主要包括主元体系确定和改性成分设计两部分,图6总结了不同的HEAs成分设计体系,可根据主元素种类、相结构及功能性能对HEAs进行分类[79-85]。激光熔覆在制备HEAs涂层方面具有潜在技术优势。高冷却速率可抑制元素扩散及脆性金属间化合物的形核与长大,保证涂层形成简单的固溶体相结构[12,15];涂层与基体形成致密的冶金结合,通过控制工艺参数可将稀释率控制在较低水平,避免基体元素过度稀释涂层成分,维持HEAs的设计特性;能够精确混合不同元素粉末,以调整HEAs的主元种类和强化成分,获得不同的涂层性能。激光熔覆制备HEAs的研究聚焦于通过元素成分调控与工艺优化,实现涂层性能的定向强化。不同元素对HEAs性能的影响机制主要可以归纳为:(1)固溶强化。原子尺寸差异较大的元素(如W、Mo、V等)融入合金基体,引发的晶格畸变;(2)第二相强化。通过添加Ti、B、C等元素,在基体中弥散析出高硬度的碳化物(TiC、NbC、WC)、硼化物(CrB、Ni_3B)或金属间化合物(Ni_3V、Laves相等);(3)细化晶粒。HEAs的“迟滞扩散效应”本身就能抑制晶粒长大,而特定元素(如W、Mo、稀土元素)或增强相颗粒的添加,可以通过提供更多的形核位点或钉扎晶界,进一步细化晶粒组织。

激光熔覆制备HEAs的研究聚焦于通过元素成分调控与工艺优化,实现涂层性能(硬度和耐磨损、耐腐蚀、高温性能等)的定向强化,提高了涂层在苛刻环境的使役性能。激光熔覆HEAs涂层获得高硬度和优异耐磨性能的关键在于通过合理设计主元(如Al、Mo、Nb、Ti等)诱导BCC相或析出纳米级硬质相(碳化物、硼化物),结合快速凝固细晶强化及固溶强化效应。

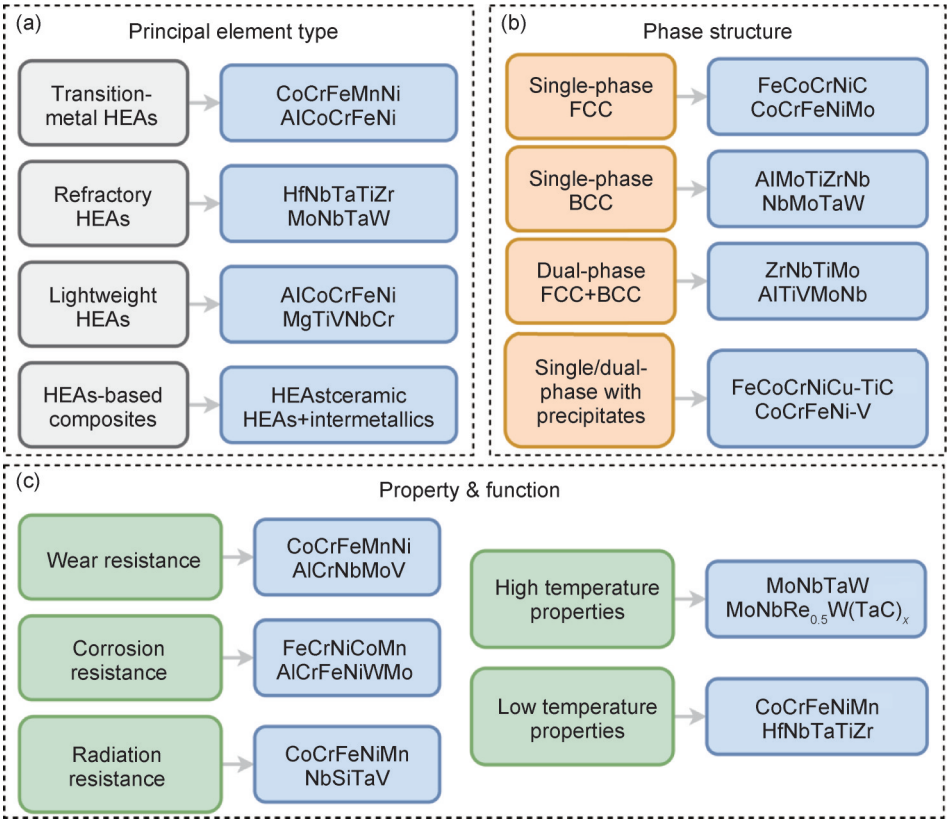


图 6　HEAs 成分体系及分类[79-85]

(a)主元素类别;(b)相结构;(c)功能性能

Fig.6　Principal elemental systems and modifying components of HEAs[79-85]

(a)principal element type;(b)phase and crystal structure;(c)properties and functions

Meng 等[86]在 38CrMoAl 钢表面通过预置粉末激光熔覆技术制备了 CoCrNiAlSiFeNb 和 CoCrNiAlSiFeNbTi 共晶 HEAs 涂层，通过 Nb 诱导形成了纳米层状 BCC+Laves 共晶结构，而 Ti 的引入则构建了“过共晶-共晶-亚共晶”的梯度分布及 β-Ti(Nb)沉淀相，实现了组织的跨尺度调控；Xiong 等[87]通过超高速激光熔覆制备了 AlFeCrNiCuTi$_x$(x=0,0.5,1.0,2.0)涂层，Ti 的添加不仅驱动相结构由单一 BCC 向 BCC+Laves 多相转变，还促进了柱状晶向等轴晶的形态演变，显著提升了硬度与耐磨性；罗方焰等[88]采用激光熔覆工艺在 Q235B 基体上制备了等原子比 CoCrFeNiV 涂层，发现 V 元素促进了 Ni_3V 金属间化合物的析出，与 FCC 基体构成了典型的“软基体支撑硬质点”结构，优化了耐磨损性能；Huang 等[89]采用超高速激光熔覆技术在 Ni60A 基体上成功制备了 NbMoTaW 涂层，实现了最大晶格畸变和最佳的塑性变形抵抗能力，涂层硬度达 12.95 GPa。然而，激光熔覆制备 HEAs 涂层的硬度和韧性往往难以兼具，高硬度的 BCC 相、Laves 相或陶瓷强化相会显著降低位错运动能力，提升脆性断裂倾向；而韧性提升(如 FCC 相、纳米析出弥散分布)又会牺牲耐磨性。为实现硬度、耐磨损和韧性俱佳的 HEAs 涂层，关键在于打破强与韧的对立，可从成分设计、结构调控等方面进行优化。在成分与相结构调控方面，可通过调整主元元素，优化软硬相(如 FCC/BCC)的比例与分布，实现硬度与韧性的平衡。

激光熔覆 HEAs 提升耐腐蚀性能的机制主要是激光熔覆的高冷却速率能有效抑制元素偏析，促使涂层形成均匀、细小的晶粒(如单一 FCC/BCC 相或细化的共晶层片)，这种高度均匀的微观结构显著降低了相间的微电偶电位差，从源头上抑制了电偶腐蚀与点蚀的萌生；通过合理添加致钝元素，HEAs 在腐蚀介质中能快速原位生成连续、致密且富铬/铝的钝化膜(如 Cr_2O_3、Al_2O_3)，有效阻断腐蚀离子(如 Cl^-)的侵入，提升抗局部腐蚀能力。Jin 等[90]通过超高速激光熔覆在 T91 钢上制备了 AlTiFeCrMoSi$_{0.2}$ 涂层，以解决第四代铅冷快堆结构材料在高温液态铅-铋共晶(LBE)环境中的腐蚀问题。Song 等[91]在 SUS304 钢板表面通过激光熔覆制备了 FeCoCrNiMoCu$_{0.8}$Si$_x$(x=0.2,0.3,0.4)共晶涂层，研究表明 Si$_{0.4}$ 合金表现出最佳耐腐蚀性能，Si 在腐蚀过程中优先氧化形成 SiO_2，同时促进

Cr_2O_3的富集，形成的复合氧化物层显著增强了钝化膜的稳定性和自修复能力。

在高温性能提升方面，Al、Cr、Si 等元素优先形成连续致密的氧化膜，能够有效阻止氧元素向内扩散；此外，HEAs 的迟滞扩散效应降低了元素在高温下的迁移速率，减缓高温下的氧化过程。Li 等[92]制备了 FeCoCrNiAl 涂层，并研究了其在 800 ℃下的氧化和磨损行为。涂层在 800 ℃展现了优异的抗氧化性能，200 h 氧化后增重仅 0.09 mg/cm^2。Cai 等[93]在铝形成奥氏体（AFA）钢上以不同激光功率（300～540 W）沉积了 FeCoCrNiMo 涂层，系统地研究了其对 600 ℃高温摩擦学性能的影响。涂层由 FCC 基体（柱状晶）和少量 σ 相颗粒组成。在 300 W 低激光功率下，FCC 相占比 97.1%，σ 相为 2.9%，平均晶粒尺寸 28.44 μm，硬度达到最高的 647HV，此时磨痕最窄最浅，磨损率最低。Xie 等[94]对比了激光熔覆与真空熔覆制备的 NiCoFeCrMo 涂层在 600 ℃下的高温氧化行为。激光熔覆涂层因其更细的晶粒组织、更高的位错密度以及更均匀的元素分布，表现出更优异的氧化抗性。难熔 HEAs 为了追求极端高温下的性能突破，其成分设计引入了极高熔点、易偏析、本征脆的元素，增加了该类材料的加工难度。激光熔覆输入能量密度高、熔池凝固速率快的工艺特性，为制造难熔 HEAs 提供了有利条件。

激光熔覆 HEAs 的优异性能是高熵效应与激光快速凝固协同作用的结果，表 2[85,89,93-98]总结了激光熔覆 HEAs 涂层不同性能强化的机制。激光制备高性能 HEAs 涂层的关键在于要充分发挥激光熔覆工艺非平衡快速凝固和 HEAs 多主元效应的协同作用，主要体现在以下方面：（1）组织细化与偏析抑制。激光熔覆高达 10^6 K/s 的冷却速率，结合 HEAs 的“迟滞扩散效应”，能够有效抑制了原子的长程扩散和元素偏析，这种动力学阻滞促使涂层形成极其细小的等轴晶或胞状晶，实现了显著的细晶强化；（2）激光熔覆过程中的“溶质截留”效应能够促进多种原子半径差异大的元素形成过饱和固溶体，加剧了晶格畸变；（3）强化相原位自生与界面优化。激光熔覆熔池内能够发生剧烈的化学反应，通过原位生成纳米级硬质相（如碳化物、硼化物），产生弥散强化效果。此外，通过精确控制激光热输入，能够实现涂层与基体形成可靠冶金结合的同时降低稀释率，保持涂层的高熵特性。

表 2 激光熔覆制备 HEAs 涂层的性能强化机制[85,89,93-98]

Table 2 Strengthening mechanisms of laser-clad HEAs coatings[85,89,93-98]

Property	Mechanism
Hardness and wear resistance	Grain refinement: rapid solidification limits dendrite growth, producing fine grains
	Solid solution strengthening: large atom size mismatch induces lattice distortion, impeding slip
	Second-phase strengthening: formation of hard BCC, Laves, or amorphous phases enhances hardness and wear resistance
	Oxide film lubrication: formation of a smooth, dense oxide film (*e.g.*, Al_2O_3) reduces the friction coefficient
Corrosion resistance	Passivation protection: Al, Cr, and Ti react with oxygen, forming a dense passive film that isolates corrosive media
	Microstructure densification: rapid solidification produces fine grains, minimizing compositional segregation and micro-corrosion channels
Oxidation resistance	Oxide film protection: Al, Cr, and Ti form a continuous dense oxide film, preventing inward oxygen transport
	Diffusion suppression: sluggish diffusion effect in HEAs lowers elemental mobility at elevated temperatures, decelerating oxidation kinetics
Strength and toughness	Coordinated deformation: the different slip systems of the FCC and BCC phases enable phase boundaries to effectively constrain dislocation motion and simultaneously relieve local stress
	Eutectic structure: the refined lamellar eutectic (*e.g.*, FCC/BCC dual-phase) enables abalance between strength and ductility
	Precipitation strengthening: elastic interactions between fine precipitates and dislocations enhance strength without lowering ductility
High tepmerature stability	Sluggish diffusion: the high configurational entropy lowers the driving force for atomic migration, inhibiting grain coarsening and phase transitions at high temperatures
	Strong covalent bonding: increasing atomic diffusion barriers and retaining phase stability upon annealing

激光熔覆制备 HEAs 涂层依然面临诸多挑战，主要体现在：（1）成分设计复杂，多主元体系相结构难以预测，在熔覆某些特定合金体系时，快速凝固会生成非平衡脆性相；（2）涂层开裂问题突出，高硬度 BCC 相及残余拉应力导致裂纹敏感性强，尤其在大厚度或多层熔覆时更为显著；（3）工艺窗口窄，激光功率、扫描

速度、送粉率等工艺波动影响相组成与缺陷形成。

3.2.2　非晶合金

非晶合金(amorphous alloy),又称为金属玻璃(metallic glass),具有长程无序而短程有序的原子结构特征,消除了晶界、位错等传统晶体缺陷,提升了硬度和耐磨性能。此外,非晶结构化学成分高度均匀,表面极易形成致密、均匀的钝化膜,能有效阻碍腐蚀介质(如Cl^-)的渗透,大幅提高耐腐蚀性能。激光熔覆制备非晶合金涂层的机理在于利用超高冷却速率突破非晶形成临界冷却速率限制(通常需要$>10^5$ K/s),有效抑制液态金属在凝固过程中的晶体形核与长大,从而保留非晶态结构[6,99]。

激光熔覆制备非晶涂层的主流体系为Fe基、Ni基和Zr基三类,分别具有低成本高耐磨(Fe基)、高耐蚀耐高温(Ni基)和高非晶形成能力(Zr基)的性能特点。Fe基非晶是目前研究最广泛、工程应用潜力最大的非晶涂层材料体系[7,99]。早期的激光熔覆制备Fe基非晶涂层的研究主要集中在对传统Fe基非晶合金成分的直接或优化应用,主要包括Fe-Co-Ni-Zr-Si-B、Fe-Nb-Ti、Fe-Cr-Mo-C-B-Si等成分体系。张新宇等[100]在40Cr钢表面通过双层激光熔覆工艺制备了无裂纹Fe基非晶复合涂层,优化后的涂层硬度为基体的3倍;俞伟元等[101]使用超高速激光熔覆技术制备了Fe基非晶合金涂层,非晶相含量达74.78%、显微硬度达1215.9HV,且耐蚀性和耐磨性优异。Wu等[102]在Q235钢基体上制备了FeCrMoCBSi非晶涂层,涂层最大厚度可达1 mm。为进一步提升涂层的非晶含量和性能,研究人员采用了添加第二相颗粒、混合HEAs或使用复合工艺等手段。张新宇[103]向Fe非晶粉末中添加了质量分数为5%的WC-14Co,在熔覆过程中部分WC分解并与Fe、Cr等反应,原位生成了200～500 nm的WC增强相,通过细晶强化、弥散强化、非晶基体的协同作用,获得了硬度高达938$HV_{0.1}$的涂层(为基体40Cr的3倍)。Song等[104]向Fe基非晶粉末中加入了$Al_{0.5}$CoCrFeNi(质量比49∶1),发现HEAs的添加改变了熔池的动力学条件,促进了非晶相形成,非晶含量提高了14.4%。Song等[105]采用超声振动辅助激光熔覆制备Fe基非晶涂层,超声振动产生的空化效应细化并破碎了界面柱状晶,使柱状晶平均长度从25.26 μm减小至10.73 μm,非晶含量从68.5%提高至75.3%。

Ni基非晶涂层的性能优势主要体现在:(1)凭借Ni元素的本征化学惰性,Ni基非晶涂层耐腐蚀性能优异;(2)Ni基体系的非晶转变温度和晶化温度较高,有利于涂层在高温工况下保持结构稳定;(3)部分Ni基非晶合金具有软磁性能,可用于特殊电磁功能器件。激光熔覆制备Ni基非晶涂层的工作主要集中在工艺优化、非晶成分体系设计优化等方面,以提升涂层的性能。不同的合金体系存在各自的最优工艺窗口,Li等[106]在低碳钢基体上激光熔覆了$(Ni_{0.6}Fe_{0.4})_{65}B_{18}Si_{10}Nb_4C_3$非晶涂层,成形涂层显微硬度高达1187$HV_{0.2}$;柳吉华等[107]在AZ91HP镁合金表面成形了$Ni_{60.2}Zr_{33.8}Al_6$涂层,发现随着扫描速率的增加,非晶含量先增大后降低,涂层在10 mm/s扫描速率时获得了最高的硬度。激光熔覆Ni基非晶涂层难以形成全非晶结构,多为非晶基体+原位析出的第二相,其形成机制是Ni基合金的本征非晶形成能力较弱,临界冷却速率较高(与Zr基合金相比),即使优化工艺也难以完全抑制晶化,在一定程度上限制了Ni基非晶涂层的性能上限;Ni基非晶涂层常见的析出相主要包括金属间化合物或碳化物(Ni_2Zr_5、Ni_3Zr、Ni_5Ta、Al_3Zr_5、NbC等),可通过第二相强化提升涂层性能。

Zr基非晶合金具有临界冷却速率低、宽过冷液相区等特点,是最早用于激光熔覆的非晶体系之一。Zr基合金的临界冷却速率较低(部分体系低于10^2 K/s),在激光熔覆条件下极易形成具有高非晶含量甚至全非晶的涂层。Ye等[108]在激光功率250 W、扫描速率10 mm/s条件下制备$Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$涂层,获得了高比例非晶相;Yue等[109-110]在镁基体上激光熔覆了$Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5}$非晶合金,涂层厚度约1.5 mm,在深度达1.1 mm范围内涂层具有完全非晶结构。Zr基非晶合金通常具有宽过冷液相区,即在非晶转变温度与晶化温度之间存在一个较宽的热稳定区间,这一特性降低了非晶形成对激光熔覆热输入波动的敏感性,提高了Zr基非晶合金涂层对熔覆工艺参数的适应性。此外,激光熔覆Zr基非晶合金可通过构筑梯度结构缓解界面应力集中并实现性能调控。Zhang等[111]在钢基体上制备了$(Zr_{0.53}Al_{0.1}Ni_{0.05}Cu_{0.3}Ti_{0.02})_{99}Y_1$非晶涂层,表面非晶层厚度约180μm,涂层呈现非晶表面层、非晶-晶态过渡层-基体的梯度结构,表面非晶层耐腐蚀性能优异,实现了硬度、韧性、耐腐蚀性的协同优化。除了上述三类主流非晶合金体系外,Cu基[112]、Co基[113-114]、Ti基[115]等非晶体系也在高温耐磨、中子屏蔽、生物相容等功能需求方面展现出应用潜力。

在激光熔覆制备非晶涂层过程中,合金成分设计和熔覆工艺参数是两个核心环节,共同影响着非晶相的形成,缺陷的抑制以及涂层的最终性能。工艺控制的关键是在保证涂层与基体冶金结合的前提下,创造出有利于非晶形成与稳定的超快冷却条件,并同时抑制裂纹、气孔等缺陷,除了对激光功率、扫描速率等主

要工艺参数进行调控外，还可通过预热缓冷、外场辅助、激光重熔等手段提升涂层非晶比例，降低热裂纹倾向。在成分优化方面，需设计出在激光熔覆非平衡快速凝固条件下具有足够非晶形成能力及充足热稳定性的合金体系，除了对成分进行精准调控外，还可通过微合金化、梯度成分设计或主动设计“非晶基体＋增强相”复合涂层等方法，提高涂层的工艺性和综合性能。

3.3 金属基复合材料

MMCs涂层可将金属的强韧性、工艺性和增强相硬质耐磨性有机结合起来，获得“刚柔并济”的综合性能[116]。激光熔覆制备MMCs需要有效匹配和调控“基体＋增强相”，金属相是MMCs的基体，它赋予了涂层基本的韧性、与工件基体的结合强度以及一定的耐腐蚀性能，常见的金属相包括Fe基、Ni基、Co基、Ti基、Al基、HEAs等；增强相是提升涂层硬度、耐磨损、耐高温、耐腐蚀等性能关键因素，常用的增强相包括碳化物、氮化物、氧化物、硼化物等。激光熔覆工艺适用的MMCs体系广，材料成分设计灵活性高，在材料体系选择时要充分考虑增强相的强化功能及其与金属基体的适配性，选择与基体相容性好、热物理性能匹配、在激光熔覆非平衡条件下能稳定存在的增强相，同时优化基体的成分设计以增强对增强相的润湿和包覆能力。表3[13,16,26,95,117-134]梳理了不同类型增强相的主要特点及适用的金属基体。MMCs涂层对激光熔覆工艺参数较敏感，不当的参数组合会导致非晶/陶瓷相分解、增强相分布不均、界面弱化、裂纹气孔等缺陷。

表3 激光熔覆复合材料中常见增强相的特点及功能[13,16,26,95,117-134]

Table 3 Properties and functions of frequently used strengthening phases of MMCs[13,16,26,95,117-134]

Type	Reinforcing phase	Property and function	Applicable metal matrix
Carbides	WC	High hardness, wear resistance, and good impact toughness	Ni, Co, HEAs
	TiC	High hardness, melting point, excellent compatibility with Ti matrix	Ti, Fe, Ni, Co
	Cr_3C_2	High-temperature stability and oxidation resistance	Ni, Co, Fe
	SiC	High hardness and elastic modulus, low density	Al, Ti
	B_4C	High hardness, low density, neutron absorption capability	Ti, Al
	VC	High hardness, high melting point, grain-refining effect	Fe,Ni, Co
	TaC	High melting point (≈3880 ℃), chemically stable at elevated temperatures	Ni, Co
	NbC	High hardness, high melting point (≈3600 ℃)	Ni, HEAs
Nitrides	TiN	High hardness, excellent chemical stability	Ti
	Si_3N_4	High strength, high-temperature resistance, oxidation resistance, thermal shock resistance	Co
	BN	Combination of lubrication and boron strengthening effects	Ti, Ni
Borides	TiB_2	High hardness, high melting point, good electrical and thermal conductivity	Ti, Ni, Cu
	Cr_2B	Excellent high-temperature oxidation and corrosion resistance	Co, Ni
Oxides	Al_2O_3	High hardness, outstanding high-temperature stability and corrosion resistance	Ni, Co, Fe, Al
	ZrO_2	Very low thermal conductivity, excellent thermal shock resistance	Fe, Ni, Ti, Al
	Rare earth oxides (*e.g.*, Y_2O_3, Ce_2O_3)	Grain boundary purification, grain refinement, interface improvement	Ti, Ni
Graphene		Excellent self-lubricating, mechanical, and thermal properties	Ti,Ni, Co, Al, Fe, HEAs

增强相的尺寸和含量是激光熔覆制备MMCs涂层工艺调控的两个重要参数，对涂层的强化效果及制备工艺可行性都有决定性的影响。增强相的尺寸可分为细颗粒（微米/纳米级）、粗颗粒（数十/百微米）及多尺度混合颗粒。不同尺寸增强相对涂层有着不同的强化效果和机制[135-137]：细颗粒主要通过Orowan强化、细晶强化等机制提升涂层的硬度、强度和耐磨等性能。然而，细颗粒粉末由于比表面积大，易发生自发团聚，易氧化、吸潮，激光下可能过烧、气化，在工艺实践中往往通过包覆技术或机械合金化方法将增强相与金属粉末复合。粗颗粒在熔覆层中可以通过载荷承载作用提升抗磨粒磨损和冲击磨损性能。但是密度大的颗粒在熔池中易下沉，导致涂层底部富集颗粒，性能分布不均匀；基体与金属相结合界面处易产生应力集中，诱发裂纹。金属基复合双尺度混合增强颗粒熔覆层可通过不同尺寸颗粒的“协同增效”，实现性能的进一步提升和强化。Zhao等[138]以NiBSi-WC/WC_2粉芯丝材为熔覆材料，利用WC/WC_2颗粒在熔池

中的适度溶解和WC的原位析出，实现了双尺度WC增强Ni基涂层的制备，通过双尺度WC颗粒及其与基体界面的多重强化效应，最大限度地提升复合涂层的耐磨损性能。李鹏宇等[139]采用激光熔覆技术在Q235基板制备了316L-微米/纳米双尺度SiC的复合涂层，熔覆过程中纳米级SiC完全溶解，微米级SiC部分溶解，分解SiC生成了新的强化相FeSi、Fe_7C_3、Cr_3C_2。双尺度SiC颗粒的添加有效提升了涂层硬度，实验表明含10%（质量分数）SiC涂层的耐磨性能相比于316L涂层提升了25倍。Zhou等[140]采用高速激光熔覆工艺制备了含有微米级、亚微米级和纳米级多尺寸TiC增强的$CoCrFeNiTi_{0.6}Nb_{0.15}$涂层，提升了耐磨损和抗腐蚀性能。

增强颗粒可通过与熔覆粉末混合和熔池中原位生成两种方式添加到熔覆层中。直接混合法是将增强相颗粒与金属基体粉末通过球磨等机械混合的方法制成复合粉末，增强颗粒与金属粉末之间不发生化学反应，仅通过机械力实现结合，该方法工艺成熟，可自由选择颗粒类型、尺寸、形状和含量，设计灵活；但是在熔覆过程中，由于颗粒与金属的熔点、密度、热导率、热膨胀系数差异很大，颗粒在熔池中的受力（重力、Marangoni力、浮力、粘滞阻力）复杂，易发生沉降、上浮、团聚或偏析；结合方式以机械嵌合为主，界面弱，易成为裂纹源；某些颗粒（如WC）在高激光能量作用下，边缘会溶解进入熔池，冷却时可能原位析出新相（如W_2C、M_6C）。原位生成法不直接加入目标增强颗粒，而是向粉末中添加能够发生化学反应的前驱体（C、B、Ti、Nb、Cr_3C_2等），在激光熔覆的高温熔池中通过化学反应自发生成所需的增强相，原位生成的颗粒与基体之间为完全冶金结合，界面原子呈共格或半共格关系，无污染、无氧化膜，结合强度极高；但是颗粒尺寸、形貌难以精确预控。

目前，激光熔覆金属基复合涂层的研究主要聚焦于工艺优化与成分设计两方面，旨在实现高性能金属基复合涂层的可控制备。在工艺方面，主要通过调控激光功率、扫描速度、送粉速率等参数，在保证熔池充分熔化与良好流动性的前提下，实现“低热输入＋高冷却速率＋低稀释率”的平衡，并可结合超声振动、激光重熔等外场辅助手段，抑制裂纹与气孔等缺陷。在成分体系优化方面，研究的焦点正从传统Fe、Ni、Co基合金向HEAs基拓展，增强相由外加微米颗粒转向原位自生纳米相及多尺度协同复合强化，以改善界面结合与分布均匀性。

3.4　功能梯度材料

传统复合涂层中，不同材料之间通常存在明显的物理界面，FGM涂层可以构建一个连续变化的区域，实现成分和性能的平缓过渡[141]，激光熔覆可实现成分梯度精确调控，在制备FGM方面具有技术优势。激光熔覆制备FGM的核心目标是通过成分/结构的梯度化设计，缓解异质材料间因热物理性能差异导致的界面应力集中，实现从基体到表层的性能平稳过渡。激光熔覆制备FGM常见的材料体系包括金属＋陶瓷增强相梯度体系、异种金属梯度体系等。

金属基体＋陶瓷增强相梯度体系可实现涂层中陶瓷颗粒含量的梯度过渡，以获得涂层与基体结合处的低陶瓷颗粒含量与涂层外表面的高陶瓷颗粒含量，实现涂层在与基体良好熔合的同时尽可能提升表面性能，是FGM熔覆层设计和制备的主要方向[130,142-143]。基于激光熔覆原理的激光能量沉积工艺在制备异种金属梯度材料方面具有潜在技术优势，可以通过成分平滑过渡解决传统异种材料连接时界面突变这一难题。目前，研究人员已针对多类异种金属组合的激光能量沉积成形展开了研究[128]，包括Fe基/Cu基（45/316L/CuSn5[144]）、Ti基/Ni基（TC4/GH4169[145]）、Fe基/Ni基（316L/Rene88DT[146]）、Cu基/Ni基[147]（CuCrZr/GH4169）、Fe基/Co基（316L/Stellite31[148]）等。针对冶金不相容的异种金属，可采用增加中间层的方法避免不相容金属直接结合形成脆性的金属间化合物，如Ti基/Fe基（TC4/Cu/中碳低合金钢[149]、TC4/Inconel 625/316L[150]）。

激光熔覆制备FGM的关键环节包括材料体系设计及熔覆工艺控制，在材料体系设计方面，需根据不同材料的热物理性能参数差异，合理设计过渡区域成分，同时要保证相邻区域材料在熔覆过程中不生成有害相。在熔覆工艺控制方面，需精确控制各层材料的粉末配比与送粉量，实现成分连续/阶梯式过渡，针对具有不同材料成分配比的熔覆层，可匹配差异化的激光参数，实现工艺参数的协同优化。

3.5　激光熔覆材料创制的典型应用领域

激光熔覆制备新材料及高性能涂层的价值体现在其在苛刻工业环境中的成功应用，表4[142,151-162]列出了激光熔覆高性能涂层的一些典型应用领域。

目前，激光熔覆材料创制技术已在多个工业领域应用并发挥重要作用。在航空航天领域，激光熔覆原位合成陶瓷增强钛基复合涂层，解决钛合金表面硬度低、耐磨性差的问题，已成功应用于修复涡轮叶片、制备钛合金部件（如叶盘、机匣）的耐磨耐蚀涂层。在生物医用领域，基于激光熔覆材料创制技术思路在钛合金植入体表面制备具有良好生物相容性、耐磨性和耐体液腐蚀的复合涂层，制造或表面改性人工关节等骨

表 4 激光熔覆高性能涂层及其主要应用领域[142,151-162]

Table 4 Performances and typical applications of laser cladding[142,151-162]

Base material	Coating system	Enhanced property	Application
Ti alloys (Ti-6Al-4, TiAl, *etc.*)	NiCr-TiC, Ti-TiB_2, HEAs, *etc.*	Wear, corrosion, and oxidation resistance	Aero-engine blades, aerospace structural components
Ni alloys (Inconel 718, Inconel 625, *etc.*)	WC, TiC-Inconel 625 nanocomposite, *etc.*	Wear resistance and high-temperature fatigue resistance	Gas turbines, oil drill bits
Al alloys (AA7075, AA6061, *etc.*)	NiAl-Cr, ceramic-Ni composite, amorphous alloy, *etc.*	Hardness and corrosion resistance	Automotive engine blocks, aerospace structural parts
High-strength carbon steel/ tool steel	High-hardness Fe-Cr-Mo-C composite, graded coating, *etc.*	Hardness (>800HV) and impact resistance	Mold gears, pump and valve components
Others (Cu alloys, Mg alloys)	Metal-ceramic composite, FGM, *etc.*	Thermal conductivity and wear resistance	Electronic heat sinks, lightweight structures

科植入物。在海洋工程与石油化工领域,激光熔覆制备高硬度、耐海水腐蚀/冲蚀的钴基/镍基碳化钨涂层,强化和再制造修复海上平台部件、石油钻杆、阀门、泵类过流部件等。在能源与核工业领域,基于激光熔覆材料创制技术思路,研发用于反应堆内构件表面防护的金属-陶瓷功能梯度复合涂层,提升核电关键设备、水轮机叶片、汽轮机部件的耐磨耐腐蚀性能。在模具和冶金等领域,基于激光熔覆材料创制技术,在铜合金模具表面制备HEAs耐磨涂层,修复和强化注塑模具、冲压模具、轧辊,实现模具表面性能提升和再制造修复延寿;在工程机械和煤矿等领域,采用激光熔覆技术在活塞杆表面制备替代电镀铬的耐磨耐蚀涂层。

4 面临的技术挑战和发展趋势

4.1 面临的技术挑战

基于激光熔覆创制新材料是一个系统工程,包括熔覆材料成分设计及制备、熔覆工艺控制(主要是缺陷抑制与组织优化)、性能评价与考核等关键环节。目前,基于激光熔覆的材料创制理论与技术仍面临一些挑战。

(1)材料成分设计方面。现有的合金材料热力学与动力学数据库主要基于平衡或近平衡凝固过程。对于激光熔覆这种极端非平衡条件下的相变路径、相选择、元素分配行为,缺乏准确的预测模型,材料设计很大程度上依赖“试错法”,效率极低。此外,材料工艺性与服役性能可能存在矛盾,提高材料性能(如添加更多增强相、提高合金化程度)往往会降低其工艺性,增加开裂、孔隙的倾向。

(2)缺陷与组织调控方面。影响熔覆质量的工艺参数较多(激光功率、扫描速度、送粉速率、扫描路径、保护气氛、基板温度、层间冷却等),且参数对工艺过程具有协同影响作用,在熔覆热物理性能上存在差异的异质材料时,工艺窗口往往较窄,界面处易产生缺陷。激光熔覆层微观组织显著影响性能,而微观组织又直接受控于激光熔覆过程中材料所经历的热历程。激光熔覆具有极高的加热速率和冷却速率,凝固过程中的温度梯度和凝固速率是尤为关键的两个物理量。尽管工艺-组织-性能之间的定性关系已基本明确,但激光熔覆的众多工艺参数之间存在复杂的非线性耦合关系,导致难以建立高保真度的物理模型进行深入研究,建立具有普适性的“成分-工艺-组织-性能”精确定量关系模型仍面临诸多理论和技术难题。

(3)过程监测与闭环控制方面。激光熔覆熔池尺寸一般为毫米级、温度极高、温度梯度大。现有的传感器(如高速相机、光电二极管、红外热像仪等)虽然能够捕捉熔池信息,但如何从这些繁多、高噪声的数据中实时、准确地反演出当前的熔覆质量(如是否存在未熔合、气孔、元素烧损),并进行毫秒级的闭环控制(如动态调整激光功率),目前的技术手段尚不可靠。

(4)性能评价与考核方面。激光熔覆作为一个高速发展的技术,其材料的疲劳、蠕变、断裂韧性等高周性能数据相对匮乏,传统的测试标准往往直接借用锻件标准,难以准确评估增材制造材料独特的失效模式。激光熔覆制备材料内部结构复杂,存在不均匀性和各向异性,残余应力、疲劳寿命等核心性能难以精确评价。在残余应力评价方面,高温度梯度在构件内部积累下巨大的残余应力,极易导致构件变形、开裂,并严重影响其服役寿命,精确表征这种高度不均匀的残余应力场难度极大,目前尚缺乏可靠的工具和方法来确定残余应力的真实状态。在疲劳寿命评价方面,由于气孔、未熔合等微米级缺陷的存在,疲劳性能的

分散性极大，难以建立面向激光熔覆材料的缺陷特征（如尺寸、位置、形貌）与疲劳寿命之间的可靠关联。

4.2　发展趋势

激光熔覆在材料创制领域的研究和应用，正朝着工艺调控/成分设计数智化、极端服役环境适配化和技术融合化等方向发展，可以重点关注如下几个方面。

（1）工艺调控/成分设计数智化转型。利用人工智能和大数据优化工艺，结合数字孪生与实时传感技术实现全过程模拟与精准调控。通过对大量实验数据的学习，利用机器学习模型快速预测不同元素配比的性能，缩短传统方法的漫长研发周期。基于机器学习建立工艺参数与质量性能的非线性关联，实现熔覆工艺参数的快速优化；还可通过传感数据实时调整工艺参数，实现“自适应”闭环控制，确保熔覆质量稳定可控。

（2）新材料体系设计方法创新。在材料体系设计方面跳出传统合金材料设计局限，转向以HEAs、非晶合金、多元/复合陶瓷增强、FGM、原位自生复合材料等为代表的多主元、多功能、高性能新材料体系，并深入研究其强化机理。通过高通量计算等手段进行材料设计，结合人工智能和物理模型，建立激光熔覆材料设计的“实验-计算-数据”闭环系统，实现从传统的“依赖经验筛选”到数据驱动的“按需生成式设计”。

（3）极端环境适应性提升。目前对涂层在极端温度、高压、特殊腐蚀环境下的性能研究仍不足，这是未来需要重点突破的领域。具体发展方向包括：多功能一体化，面对多因素耦合的服役环境，开发能同时耐受多种极端环境的涂层；高性能化，进一步突破传统熔覆材料性能极限；多策略协同，采用成分优化、结构设计、工艺创新等综合手段实现性能提升。

（4）多学科技术深度融合。与材料基因组工程、人工智能、环境科学、传感器技术等领域交叉结合，开发智能响应涂层、绿色涂层等；进一步发展多能场复合工艺，深度融合电磁场、热场、超声场等，实现“电-磁-热-力”多场协同调控，精准干预熔池凝固行为，抑制缺陷并优化组织；推进工艺链复合，将激光熔覆与表面织构、热处理、机加工等工艺贯通集成，形成“成形-改性-精整”一体化复合工艺链路。

参考文献

[1] 张坚，吴文妮，赵龙志.激光熔覆研究现状及发展趋势[J].热加工工艺，2013，42(6)：131-134.
Zhang J，Wu W N，Zhao L Z.Research progress and development trend of laser cladding[J].Hot Working Technology，2013，42(6)：131-134.

[2] 沈宇，关义青，白松，等.激光熔覆技术的发展现状及展望[J].制造技术与机床，2011(10)：21-24.
Shen Y，Guan Y Q，Bai S，et al.Development status and prospects of laser cladding technology[J].Manufacturing Technology & Machine Tool，2011(10)：21-24.

[3] Li G S，Zhang X Y，Li H C，et al.The strategies for enhancing the wear resistance of titanium alloy via laser cladding：a review[J].International Journal of Refractory Metals and Hard Materials，2026，136：107607.

[4] Liu Y N，Ding Y，Yang L J，et al.Research and progress of laser cladding on engineering alloys：a review[J].Journal of Manufacturing Processes，2021，66：341-363.

[5] Peng J，Zhou E，Feng R，et al. Research progress and current status of gas-solid two-phase flow technology in the direction of laser cladding [J]. Micromachines，2024，15(10)：1190.

[6] 张树豪，王优强，黄淑元，等.激光熔覆非晶涂层研究现状及进展[J].热加工工艺，2026，55(8)：110-117.
Zhang S H，Wang Y Q，Huang S Y，et al.Research status and progress of laser cladding amorphous coating[J].Hot Working Technology，2026，55(8)：110-117.

[7] 杨继凯，钱波，沈言雨，等.激光熔覆铁基非晶合金涂层成分及工艺性能研究进展[J].热喷涂技术，2025，17(4)：30-49.
Yang J K，Qian B，Shen Y Y，et al.Research progress of laser cladding iron-based amorphous alloy coatings：composition，process and properties [J]. Thermal Spray Technology，2025，17 (4)：30-49.

[8] Ji X L，Luo C Y，Jin J，et al.Tribocorrosion performance of 316L stainless steel enhanced by laser clad 2-layer coating using Fe-based amorphous powder [J]. Journal of Materials Research and Technology，2022，17：612-621.

[9] Liu X B，Bi J Z，Meng Z Y，et al.Tribological behaviors of high-hardness Co-based amorphous coatings fabricated by laser cladding [J].Tribology International，2021，162：107142.

[10] Wang H N，Cheng Y H，Wan Y X，et al.Influence of scanning speed on microstructure and corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings by high-speed laser cladding[J].Surface and Coatings Technology，2024，479：130449.

[11] Zhang C W，Li Q，Zhang X，et al.Effects of HVOF sprayed，laser cladding and laser remelted preparation process on wear and corrosion properties of Fe-based amorphous alloy coatings[J].Surface and Coatings Technology，2025，511：132292.

[12] 张翔，李小兵，严文超，等.高熵合金激光增材制造的研究进展[J].材料热处理学报，2025，46(7)：10-23.
Zhang X，Li X B，Yan W C，et al.Research progress on laser additive manufacturing of high-entropy alloys[J].Transactions of Materials and Heat Treatment，2025，46(7)：10-23.

[13] 李泽邦，曾宇阳，徐猛，等.激光熔覆WC增强金属基涂层的研究进展[J].特种铸造及有色合金，2024，44(12)：1697-1705.
Li Z B，Zeng Y Y，Xu M，et al.Progress in laser cladding of tungsten carbide reinforced metal-based coatings [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys，2024，44(12)：1697-1705.

[14] 杨帆，郭一帆，邱昊，等.激光熔覆制备FeCoCrNi系高熵合金涂

层的研究进展[J].应用激光,2026,46(4):52-73.
Yang F,Guo Y F,Qiu H,et al.Research progress on laser cladding preparation of FeCoCrNi high entropy alloy coating[J].Applied Laser,2026,46(4):52-73.

[15] 韩娟,龙雨,徐流杰,等.激光熔覆高熵合金涂层的研究进展[J].材料导报,2025,39(13):199-214.
Han J,Long Y,Xu L J,et al.Research progress of high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J].Materials Reports,2025,39(13):199-214.

[16] Arif Z U,Khalid M Y,Ur Rehman E,et al.A review on laser cladding of high-entropy alloys,their recent trends and potential applications [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68:225-273.

[17] Xu Y H,Wang D Z,Wu S J,et al.Research progress on defect formation mechanism and process optimization of laser cladding high entropy alloy coatings[J].Optics & Laser Technology,2025,187:112819.

[18] 张好强,杨懿贤,王莉娜,等.陶瓷增强激光熔覆金属基涂层研究现状[J].激光杂志,2025,46(9):1-10.
Zhang H Q,Yang Y X,Wang L N,et al.Research status of ceramic reinforced laser cladding metal base coating[J].Laser Journal,2025,46(9):1-10.

[19] 张晓宇,李纪龙,慈世伟,等.激光熔覆陶瓷颗粒增强金属基复合材料研究进展[J].热喷涂技术,2024,16(1):18-34.
Zhang X Y,Li J L,Ci S W,et al.Research progress of laser cladding ceramic particle reinforced metal matrix composites[J].Thermal Spray Technology,2024,16(1):18-34.

[20] Hu Y B,Cong W L.A review on laser deposition-additive manufacturing of ceramics and ceramic reinforced metal matrix composites[J].Ceramics International,2018,44(17):20599-20612.

[21] Li N, Liu W, Wang Y, et al. Laser additive manufacturing on metal matrix composites:a review[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2021,34:38.

[22] Sun Z, Guo W, Li L. Numerical modelling of heat transfer, mass transport and microstructure formation in a high deposition rate laser directed energy deposition process[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101175.

[23] 崔承云,方翠,张文龙.Marangoni流对激光熔覆热行为和熔体流动行为的影响[J].应用激光,2018,38(3):409.
Cui C Y,Fang C,Zhang W L.Effects of Marangoni flow on the thermal behavior and melt flow behavior in laser cladding[J].Applied Laser,2018,38(3):409.

[24] 赵明娟,李宝星,吴涛,等.基于热-流耦合模型研究激光熔覆速度场影响机制[J].华东交通大学学报,2022,39(4):74-83.
Zhao M J,Li B X,Wu T,et al.Study on the effect mechanism of laser cladding velocity field based on thermal-fluid coupling model [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4):74-83.

[25] 宋宝强,门秀花,张国昌,等.激光熔覆熔池动态演化及缺陷工艺调控研究进展[J].表面技术,2024,53(10):71-91.
Song B Q,Men X H,Zhang G C,et al.Review of dynamic evolution of laser cladding molten pool and defect process regulation [J].Surface Technology,2024,53(10):71-91.

[26] 蔡绪康,王磊磊,杨兴运,等.激光熔化沉积TiC/TC4复合材料热-流行为及陶瓷颗粒分布状态[J].焊接学报,2024,45(5):74-83.
Cai X K,Wang L L,Yang X Y,et al.Thermal-fluid behavior and distribution of ceramic particles during laser melting deposition of TiC/TC4 composite materials [J]. Transactions of the China Welding Institution,2024,45(5):74-83.

[27] Schopphoven T,Gasser A,Wissenbach K,et al.Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying[J].Journal of Laser Applications,2016,28(2):022501.

[28] 肖明颖,范振红.超高速激光熔覆技术研究现状及发展展望[J].粉末冶金材料科学与工程,2024,29(3):151-161.
Xiao M Y,Fan Z H.Research status and development prospect of extreme high-speed laser cladding technology[J].Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy,2024,29(3):151-161.

[29] Liang Y,Liao Z Y,Zhang L L,et al.A review on coatings deposited by extreme high-speed laser cladding:processes,materials,and properties[J].Optics & Laser Technology,2023,164:109472.

[30] Wu Y W,Tang Y T,Barras J,et al.Understanding extreme high-speed laser material deposition:characterisation,modelling and bonding mechanisms[J].Surface and Coatings Technology,2025,511:132218.

[31] Zhou L,Ma G Z,Zhao H C,et al.Research status and prospect of extreme high-speed laser cladding technology[J].Optics & Laser Technology,2024,168:109800.

[32] 张大成,李昌,许彦,等.光粉作用下激光熔覆粉末射流行为研究[J].热加工工艺,2022,51(20):97-103.
Zhang D C,Li C,Xu Y,et al.Study on behavior of laser cladding powder jet flow under interaction of laser and powder[J].Hot Working Technology,2022,51(20):97-103.

[33] 范红丽,齐海波,张钊,等.基于CFD-DEM的激光熔覆粉末利用率仿真分析[J].表面技术,2024,53(17):146-156.
Fan H L,Qi H B,Zhang Z,et al.CFD-DEM simulation on powder catchment efficiency in laser cladding[J].Surface Technology,2024,53(17):146-156.

[34] 赵陈敏,练国富,冯美艳,等.基于激光光斑直径的激光熔覆粉末汇聚特性数值模拟[J].激光与红外,2021,51(6):727-733.
Zhao C M,Lian G F,Feng M Y,et al.Numerical simulation of convergence characteristics of laser cladding powder based on laser spot diameters[J].Laser & Infrared,2021,51(6):727-733.

[35] 颜瑞峰,麻明章,许建波.激光熔覆同轴送粉过程的两相流模拟与试验研究[J].应用激光,2021,41(3):636-642.
Yan R F,Ma M Z,Xu J B.Two-phase flow simulation and experimental research on coaxial power feeding process of laser cladding [J].Applied Laser,2021,41(3):636-642.

[36] 王明娣.基于光内送粉的激光熔覆快速制造机理与工艺研究[D].南京:南京航空航天大学, 2008.
Wang M D.Research on mechanism and process of laser cladding rapid manufacturing using coaxial inside-beam powder feeding [D].Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008.

[37] 邵其文.基于光内送粉的激光熔覆快速成形技术研究[D].苏

州：苏州大学，2008.
Shao Q W. Study on the technology of inside-laser coaxial powder feeding cladding and rapid prototyping process of laser [D]. Suzhou: Soochow University, 2008.

[38] 蔡齐飞，石世宏，李春生，等. 激光熔覆快速成形光内送粉方式的研究[J]. 苏州大学学报(工科版)，2009，29(2)：43-45.
Cai Q F, Shi S H, Li C S, et al. Study on inside-laser powder feeding of laser cladding rapid prototyping [J]. Journal of Suzhou University (Engineering Science Edition), 2009, 29(2): 43-45.

[39] 杜学芸，田洪芳，董仕营，等. 大功率光纤激光内孔熔覆装备开发及应用[J]. 热喷涂技术，2019，11(2)：31-35.
Du X Y, Tian H F, Dong S Y, et al. The design and application of high-power fiber laser cladding equipment on ring inner wall [J]. Thermal Spray Technology, 2019, 11(2): 31-35.

[40] 石皋莲，石世宏，吴少华，等. 光内送粉激光熔覆快速成形粉末利用率实验研究[J]. 热加工工艺，2010，39(7)：152-154.
Shi G L, Shi S H, Wu S H, et al. Research on effective utilization rate of power in inside-laser coaxial powder feeding laser cladding and rapid prototyping process [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(7): 152-154.

[41] Dalaee M T, Gloor L, Leinenbach C, et al. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates induction heating-assisted laser direct metal deposition (IH-DMD)[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 384: 125275.

[42] Zhang D Q, Du D, Xue S, et al. Study on Mitigation of interfacial intermetallic compounds by applying alternating magnetic field in laser-directed energy deposition of Ti6Al4V/AA2024 dissimilar materials[J]. Metals, 2024, 14(11): 1250.

[43] Zhang H, Dai X, Guo H, et al. Influence of synchronized rolling-assisted process on crack and properties of Ni-WC laser cladding layers [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 15663.

[44] Han J S, Wang S H, Ge W J, et al. Non-contact ultrasound to assist laser additive manufacturing [J]. Nature Communications, 2025, 16: 7613.

[45] 李毅，王振忠，肖宇航，等. 金属激光增材＋X复合制造技术综述[J]. 航空学报，2024，45(13)：133-155.
Li Y, Wang Z Z, Xiao Y H, et al. Review of laser-metal additive manufacturing＋X hybrid technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(13): 133-155.

[46] 李丽君，王豫跃，张安峰，等. 感应加热辅助Si细化激光熔覆沉积TC4晶粒的研究[J]. 中国激光，2018，45(6)：83-88.
Li L J, Wang Y Y, Zhang A F, et al. Silicon refinement of TC4 grains by induction heating assisted laser cladding deposition [J]. Chinese Journal of Laser, 2018, 45(6): 83-88.

[47] 胡朝丹. 激光熔覆-重熔复合工艺在316L不锈钢表面制备富ZrCr涂层及组织性能研究[D]. 重庆：重庆理工大学，2025.
Hu C D. Preparation of ZrCr-rich coating on the surface of 316L stainless steel by laser cladding-remelting composite process and its microstructure and properties [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2025.

[48] 黄添，舒林森，陈向东，等. 激光重熔功率对镍基高温合金熔覆层组织性能的影响[J]. 材料热处理学报，2024，45(11)：198-206.
Huang T, Shu L S, Chen X D, et al. Effect of laser remelting power on microstructure and properties of Ni-based superalloy cladding coating [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(11): 198-206.

[49] 王宇豪，周后明，王泽达，等. 电磁场对激光熔覆镍基涂层组织性能的影响[J]. 表面技术，2024，53(21)：198-207.
Wang Y H, Zhou H M, Wang Z D, et al. Effect of electromagnetic field on microstructure properties of laser cladding nickel-based coatings[J]. Surface Technology, 2024, 53(21): 198-207.

[50] 王茜，张亮，李倩，等. 电磁场辅助激光熔覆技术的研究进展[J]. 表面技术，2023，52(6)：166-179.
Wang Q, Zhang L, Li Q, et al. Research progress of electromagnetic field assisted laser cladding technology [J]. Surface Technology, 2023, 52(6): 166-179.

[51] 姚喆赫，杨诗轩，祝毅，等. 超声振动对激光熔覆过程应变场的影响研究[J]. 红外与激光工程，2024，53(11)：78-90.
Yao Z H, Yang S X, Zhu Y, et al. Effects of ultrasonic vibration on the strain field during laser cladding process [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(11): 78-90.

[52] Wang J Z, Zhou J Z, Zhang T, et al. Ultrasonic-induced grain refinement in laser cladding nickel-based superalloy reinforced by WC particles[J]. Coatings, 2023, 13(1): 151.

[53] 赵新亚，霍苗，郝维哲，等. 冲击/振动辅助激光增材制造组织及残余应力调控研究进展[J]. 材料导报，2026，40(22)：25080176.
Zhao X Y, Huo M, Hao W Z, et al. Research progress on microstructure and residual stress control in impact/vibration assisted laser additive manufacturing [J]. Materials Reports, 2026, 40(22): 25080176.

[54] 李召旭，胡效东，董世运. 高温固相原位激光冲击技术在再制造领域的研究进展[J]. 表面技术，2025，54(19)：1-13.
Li Z X, Hu X D, Dong S Y. Research progress on high-temperature solid-phase *in-situ* laser shock technology in remanufacturing [J]. Surface Technology, 2025, 54(19): 1-13.

[55] 郑敏，黄婷，肖荣诗. 脉冲激光辅助激光增材制造研究进展[J]. 表面技术，2024，53(13)：1-12.
Zheng M, Huang T, Xiao R S. Research progress on pulse laser-assisted laser additive manufacturing [J]. Surface Technology, 2024, 53(13): 1-12.

[56] 董呈. 用于内孔修复的激光熔覆送粉喷嘴的设计及实验研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2023.
Dong C. Design and experimental study of laser cladding powder feeding nozzle for inner hole repair [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.

[57] 徐仕成. 油管内壁镍基防腐涂层激光熔覆工艺研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2023.
Xu S C. Study on process of laser cladding nickel based anti-corrosion coating on the inner wall of oil pipe [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.

[58] 宋玉杰，吴意发，祖海英，等. 基于激光熔覆机器人的复杂曲面路径规划与实现[J]. 中国表面工程，2025，38(4)：335-346.
Song Y J, Wu Y F, Zu H Y, et al. Path planning and realization of complex surface based on a laser-cladding robot [J]. China Surface Engineering, 2025, 38(4): 335-346.

[59] 龙海洋,徐鑫,马占山,等.曲面激光熔覆的研究现状及发展趋势[J].材料导报,2025,39(18):172-179.
Long H Y,Xu X,Ma Z S,et al.Research status and development trends of curved surface laser cladding[J].Materials Reports,2025,39(18):172-179.

[60] 鲁彦志,于瑞东,王静.激光熔覆技术在大型装备修复中的应用综述[J].现代制造技术与装备,2019,55(10):163-164.
Lu Y Z,Yu R D,Wang J.Summary of application of laser cladding technology in rehabilitation of large equipment[J].Modern Manufacturing Technology and Equipment,2019,55(10):163-164.

[61] 刘宏伟,马世博,迟永波,等.可移动激光再制造修复平台设计与实验[J].精密成形工程,2023,15(1):208-218.
Liu H W,Ma S B,Chi Y B,et al.Design and experiment of movable laser remanufacturing repair platform[J].Journal of Netshape Forming Engineering,2023,15(1):208-218.

[62] 郭星星,帅美荣,王建梅,等.基于NSGA-Ⅱ算法的激光熔覆单道成形工艺参数多目标优化[J].中国表面工程,2023,36(3):87-100.
Guo X X,Shuai M R,Wang J M,et al.Multi-objective optimization of laser cladding single-pass forming process parameters based on NSGA-Ⅱ algorithm[J].China Surface Engineering,2023,36(3):87-100.

[63] Luo Y T,Zhu T,Pan C L,et al.Interpretable machine learning integrated with physicochemical feature for developing additively manufactured ultra-high strength and ductility steel[J].International Journal of Extreme Manufacturing,2026,8(4):045001.

[64] Su J L,Chen L Q,Van Petegem S,et al.Additive manufacturing metallurgy guided machine learning design of versatile alloys[J].Materials Today,2025,88:240-250.

[65] Dharmadhikari S,Menon N,Basak A.A reinforcement learning approach for process parameter optimization in additive manufacturing[J].Additive Manufacturing,2023,71:103556.

[66] Bai Q F,Ouyang C Y,Zhao C J,et al.Microstructure and wear resistance of laser cladding of Fe-based alloy coatings in different areas of cladding layer[J].Materials,2021,14(11):2839.

[67] Lin H B,Wu J X,Wang Y H,et al.High-temperature oil behavior and its impact on wear mechanisms of Fe-based coating on 42CrMo steel modified by laser cladding[J].Engineering Failure Analysis,2026,190:110757.

[68] 王海林,王金凤.激光熔覆铁基和镍基合金涂层组织与性能研究[J].特种铸造及有色合金,2025,45(9):1372-1376.
Wang H L,Wang J F.Microstructure and properties of Fe-based and Ni-based alloy coatings by laser cladding[J].Special Casting & Nonferrous Alloys,2025,45(9):1372-1376.

[69] 吴伟建,冯悦峤,李维.激光熔覆制备钴基和镍基涂层的组织与性能对比研究[J].核动力工程,2025,46(4):273-281.
Wu W J,Feng Y Q,Li W.Comparative study on the microstructure and properties of Co-based and Ni-based coatings prepared by laser cladding[J].Nuclear Power Engineering,2025,46(4):273-281.

[70] Li Y F,Qiu Y J,Shi Y,et al.Microstructure,wear and corrosion resistance of Ni-based composite coating by multi-layer laser cladding[J].Materials Today Communications,2024,41:110369.

[71] Liu J S,Shi Y.Microstructure and wear behavior of laser-cladded Ni-based coatings decorated by graphite particles[J].Surface and Coatings Technology,2021,412:127044.

[72] 任维泽,段绪星,裴泽宇,等.激光熔覆钴基合金研究进展及其在核领域的应用展望[J].金属热处理,2024,49(4):264-273.
Ren W Z,Duan X X,Pei Z Y,et al.Progress in laser cladding of cobalt-based alloys and prospects for their application in nuclear field[J].Heat Treatment of Metals,2024,49(4):264-273.

[73] 张帅,郝昭,权志勇,等.电机主轴表面激光熔覆司太立合金涂层组织及耐磨性研究[J].应用激光,2025,45(8):9-15.
Zhang S,Hao Z,Quan Z Y,et al.Study on microstructure and wear resistance of stellite alloy coating on motor spindle surface by laser cladding[J].Applied Laser,2025,45(8):9-15.

[74] 赵永胜,葛超,吴影,等.激光熔覆工艺对CoCrMo钴基合金涂层组织与性能的影响[J].表面技术,2024,53(23):216-227.
Zhao Y S,Ge C,Wu Y,et al.Effect of laser cladding process on microstructure and mechanical properties of CoCrMo cobalt-based alloy coating[J].Surface Technology,2024,53(23):216-227.

[75] Fang J X,Dong S Y,Wang Y J,et al.The effects of solid-state phase transformation upon stress evolution in laser metal powder deposition[J].Materials & Design,2015,87:807-814.

[76] 方金祥,董世运,徐滨士,等.考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析[J].中国激光,2015,42(5):503009.
Fang J X,Dong S Y,Xu B S,et al.Study of stresses of laser metal deposition using FEM considering phase transformation effects[J].Chinese Journal of Lasers,2015,42(5):503009.

[77] Li Y J,Dong S Y,Yan S X,et al.Surface remanufacturing of ductile cast iron by laser cladding Ni-Cu alloy coatings[J].Surface and Coatings Technology,2018,347:20-28.

[78] Li Y J,Dong S Y,Yan S X,et al.Elimination of voids by laser remelting during laser cladding Ni based alloy on gray cast iron[J].Optics & Laser Technology,2019,112:30-38.

[79] 吕昭平,申耀祖,王先珍,等.面向极端服役条件的高熵合金结构材料:性能优势、瓶颈与突破路径[J].金属学报,2026,62(5):743-755.
Lv Z P,Shen Y Z,Wang X Z,et al.High-entropy alloys in extreme environments:a perspective on advantages,challenges,and breakthroughs[J].Acta Metallurgica Sinica,2026,62(5):743-755.

[80] 李牧阳,汪刘应,刘顾,等.难熔高熵合金设计及防护涂层应用研究进展[J].表面技术,2026,55(7):179-200.
Li M Y,Wang L Y,Liu G,et al.Research advances in the design of refractory high-entropy alloys and applications of protective coatings[J].Surface Tecnology,2026,55(7):179-200.

[81] 王伟,陈田慧,单旭光,等.激光熔覆高熵合金涂层组织结构及强化机理研究进[J].热喷涂技术,2023,15(4):31-51.
Wang W,Chen T H,Shan X G,et al.Research progress on the microstructure and strengthening mechanism of high-entropy alloy coatings deposited by laser cladding technology[J].Thermal Spray Technology,2023,15(4):31-51.

[82] 罗一鸣,于源,任鹏伟,等.海洋环境下高熵合金的腐蚀与磨损行为研究进展[J].材料保护,2026,59(4):1-13.
Luo Y M,Yu Y,Ren P W,et al.Research progress on corro-

sion and wear behavior of high-entropy alloys in marine environments[J].Materials Protection, 2026, 59(4): 1-13.

[83] 夏兴川, 张恩宽, 丁俭,等. 激光熔覆难熔高熵合金涂层研究进展[J]. 金属学报, 2025, 61(1): 59-76.
Xia X C, Zhang E K, Ding J, et al.Research progress on laser cladding of refractory high-entropy alloy coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2025, 61(1): 59-76.

[84] 周子钧, 姜芙林, 宋鹏芳,等. 激光熔覆高熵合金涂层的耐腐蚀性能研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 257-270.
Zhou Z J, Jiang F L, Song P, et al. Advances in corrosion resistance of high entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 257-270.

[85] 余洋, 金义杰, 李文轩, 等. 激光熔覆高熵合金涂层的摩擦学性能研究进展[J/OL]. 摩擦学学报(中英文), 2026: 1-45.https://link.cnki.net/urlid/62.1224.O4.20260319.1809.005.
Yu Y, Jin Y J,Li W X, et al.Research progress on the wear resistance of high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J/OL].Tribology,2026:1-45. https://link.cnki.net/urlid/62.1224.O4.20260319.1809.005.

[86] Meng Y C,Liu W X,Liu S W,et al.Enhancing surface properties of 38CrMoAl steel with CoCrNi-based eutectic high entropy alloys via laser cladding: microstructural and tribological analysis [J].Surface and Coatings Technology,2026,520:133069.

[87] Xiong C T,Zhang J T,Wang Z J,et al.Enhanced wear and corrosion resistance of ultra-high-speed laser cladding AlFeCrNiCu high-entropy alloys by Ti doping [J]. Journal of Materials Research and Technology,2026,41:6828-6838.

[88] 罗方焰, 金宏涛, 陈泽恒, 等. 激光熔覆等原子比CoCrFeNi-V高熵合金涂层的磨损行为研究[J]. 表面技术, 2026, 55(5): 179-190.
Luo F Y, Jin H T, Chen Z H, et al. Wear behavior of the equiatomic CoCrFeNi-V high-entropy alloy coating prepared by laser cladding [J]. Surface Technology, 2026, 55(5): 179-190.

[89] Huang P Y,Miao Q,Liang W P,et al.NbMoTaW refractory high entropy alloy coatings prepared by laser cladding:from process parameters to wear mechanisms[J].Surface and Coatings Technology,2025,518:132897.

[90] Jin J J,Fu Z H,Gou G Q,et al.Liquid lead-bismuth eutectic corrosion behavior of T91 steel with ultra-high-speed laser cladding high-entropy alloy coating [J]. Corrosion Science, 2026, 267: 113876.

[91] Song Z P,Liu J,Li C W,et al.Microstructure and corrosion performance of laser-clad FeCoCrNiMo$Cu_{0.8}Si_x$ eutectic high-entropy alloy coatings:role of Si modification[J].Applied Surface Science,2026,719:165063.

[92] Li X Y,Zhu H N,Cui X F,et al.Enhanced oxidation and wear resistance of laser-clad FeCoCrNiAl high-entropy alloy coatings at 800 ℃[J].Materials Chemistry and Physics,2026,349:131691.

[93] Cai Y,Li X L,Xie Y,et al.Effect of laser power on microstructure and high-temperature tribological property of FeCoCrNiMo HEA coating deposited on alumina-forming austenitic steel[J].Journal of Materials Science,2026,61(4):2654-2672.

[94] Xie F, Zhai C S, Zhang X, et al. Microstructure, dislocation and high-temperature oxidation behavior of as-cladding NiCoFeCrMo high-entropy alloy coatings:laser cladding *vs* vacuum cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds,2025,1033:181278.

[95] 刘志, 张铮, 孙超臣, 等. 机床导轨表面激光熔覆FeCoCrNi-TaC高熵合金复合熔覆层组织及耐磨性 [J]. 应用激光, 2025, 45(6): 33-40.
Liu Z, Zhang Z, Sun C C, et al. Microstructure and wear resistance of laser cladding of FeCoCrNi-TaC high entropy alloy composite cladding layer on machine tool guide rail surface[J]. Applied Laser, 2025, 45(6): 33-40.

[96] Chen J, Jiang X S, Sun H, et al. Phase transformation and strengthening mechanisms of nanostructured high-entropy alloys [J]. Nanotechnology Reviews, 2021, 10: 1116-1139.

[97] Chu Q, Wang J, Su C, et al. Laser cladding of a novel Fe-based coating with high hardness and excellent corrosion resistance [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34(19): 21377-21388.

[98] 龙俊丞, 李彦生, 吴渊. 增材制造难熔高熵合金研究进展 [J]. 航空材料学报, 2026, 46(1): 15-29.
Long J C, Li Y S, Wu Y. Research progress on additive manufacturing of refractory high entropy alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(1): 15-29.

[99] 李垭焓,谭诚香,李梦瑶,等.激光熔覆铁基合金涂层的研究进展[J].表面技术,2024,53(6):11-27.
Li Y H, Tan C X, Li M Y, et al. Research progress of laser-cladding Fe-based alloy coating[J].Surface Technology,2024,53(6):11-27.

[100] 张新宇,吕威闫,邱克强,等.激光熔覆高耐磨无裂纹双层Fe基非晶复合涂层[J].特种铸造及有色合金,2024,44(5):692-698.
Zhang X Y,LÜ W Y,Qiu K Q,et al.Highly wear-resistant and crack-free double-layer Fe-based amorphous composite coatings by laser cladding [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024,44(5):692-698.

[101] 俞伟元,景瑞,董鹏飞,等.高速激光熔覆Fe基非晶涂层裂纹及组织分析[J].材料导报,2025,39(7):134-139.
Yu W Y,Jing R,Dong P F,et al.Crack and microstructure analysis of high-speed laser clad Fe-based amorphous coating[J].Materials Reports,2025,39(7):134-139.

[102] Wu B L,Dong P F,Yu W Y,et al.Effect of laser energy density on amorphous phase content and properties of Fe-based amorphous coatings[J].Journal of Thermal Spray Technology,2024,33(1):221-232.

[103] 张新宇.激光熔覆Fe基非晶合金复合涂层制备工艺及性能研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2023.
Zhang X Y. Study on preparation process and properties of fe-based amorphous alloy composite coating by laser cladding [D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2023.

[104] Song H L,Guo C H,Jiang F C,et al.Adding high entropy alloys to improve microstructure and properties of laser cladding Fe-based amorphous coatings[J].Journal of Non-Crystalline Solids,2023,619:122559.

[105] Song H L,Guo C H,Wu Y Y,et al.Study on crystal and amorphous transformation of ultrasonic vibration assisted laser clad-

ded Fe-based amorphous coatings[J]. Ultrasonics, 2025, 145: 107456.

[106] Li R, Chen Z, Gu J, et al. Effects of heat inputs on the structure of Ni-based amorphous composite coatings applied with laser cladding[J]. Materiali in Tehnologije, 2019, 53(4): 521-526.

[107] 柳吉华,王存山.扫描速度对激光熔覆Ni-Zr-Al合金涂层组织性能的影响[J].应用激光,2011,31(5):282.
Liu J H, Wang C S. Influence of scanning velocity on microstructure and properties of laser clad Ni-Zr-Al alloy coatings[J]. Applied Laser, 2011, 31(5): 282.

[108] Ye X Y, Bae H, Shin Y C, et al. *In situ* synthesis and characterization of Zr-based amorphous composite by laser direct deposition [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(9): 4316-4325.

[109] Yue T M, Su Y P. Laser multi-layer cladding of $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5}$ amorphous alloy on magnesium substrates[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(15): 6153-6160.

[110] Yue T M, Su Y P, Yang H O. Laser cladding of $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5}$ amorphous alloy on magnesium[J]. Materials Letters, 2007, 61(1): 209-212.

[111] Zhang N, Liu Y, Yang W, et al. Formation and properties of a Zr-based amorphous coating by laser cladding [J]. Rare Metals, 2024, 43(4): 1809-1814.

[112] Huang K J, Xie C S, Yue T M. Microstructure of Cu-based amorphous composite coatings on AZ91D magnesium alloy by laser cladding [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2009, 25(4): 492-498.

[113] Liu X B, Bi J Z, Meng Z Y, et al. Development of co-based amorphous composite coatings synthesized by laser cladding for neutron shielding[J]. Materials, 2021, 14(2): 279.

[114] Zhang L, Wang C S, Han L Y, et al. Influence of laser power on microstructure and properties of laser clad co-based amorphous composite coatings[J]. Surfaces and Interfaces, 2017, 6: 18-23.

[115] Guan K P, Yu J, Wang F T, et al. Combining laser texturing and remelting for reducing friction and corrosive wear in Ti-based amorphous alloys[J]. Precision Engineering, 2025, 93: 417-424.

[116] 师维,汪勇.陶瓷颗粒增强金属基复合材料的制备及应用[J].热加工工艺,2024,53(24):17-21.
Shi W, Wang Y. Preparation and application of ceramic particle reinforced metal matrix composites[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(24): 17-21.

[117] 刘钊鹏, 顾俊, 王健超,等. WC-Co硬质合金涂层的激光熔覆工艺研究 [J]. 应用激光, 2021, 41(4): 715-723.
Liu Z P, Gu J, Wang J C, et al. Study on laser cladding progress of WC-Co carbide coating[J]. Applied Laser, 2021, 41(4): 715-723.

[118] 单帅帅,葛媛媛,仲启朔,等.激光熔覆WC增强FeCoNiCrAl高熵合金复合涂层的组织和性能[J].材料热处理学报,2025,46(8):187-198.
Shan S S, Ge Y Y, Zhong Q S, et al. Microstructure and properties of laser cladding WC reinforced FeCoNiCrAl high-entropy alloy composite coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(8): 187-198.

[119] 吴莹,牛焱.激光熔覆添加碳化钨的镍基合金层的组织和硬度研究[J].材料保护,2005,38(2):61-63.
Wu Y, Niu Y. Microstructure and hardness of laser cladding nickel-based alloy doped with WC on Q235 steel[J]. Materials Protection, 2005, 38(2): 61-63.

[120] 李倩,陈发强,王茜,等.激光熔覆WC增强Ni基复合涂层的研究进展[J].表面技术,2022,51(2):129-143.
Li Q, Chen F Q, Wang Q, et al. Research progress of laser-cladding WC reinforced Ni-based composite coating[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 129-143.

[121] 杨凡,张志强,张宏伟,等.CeO_2对TiC_x增强钛基激光熔覆层成形质量和组织的影响[J].中国表面工程,2020,33(3):137-151.
Yang F, Zhang Z Q, Zhang H W, et al. Effects of CeO_2 on forming quality and microstructure of TiC_x-reinforced Ti-based laser cladding coating[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(3): 137-151.

[122] 杨泽华,曹润平,石向东.高速激光熔覆Ni-WC复合涂层组织和性能[J].包头职业技术学院学报,2025,26(3):1-6.
Yang Z H, Cao R P, Shi X D. Organization and properties of Ni-WC composite coatings by high-speed laser cladding[J]. Journal of Baotou Vocational & Technical College, 2025, 26(3): 1-6.

[123] 段晓溪,高士友,顾勇飞,等.激光熔覆316L+SiC的强化机制和摩擦磨损性能研究[J].中国激光,2016,43(1):62-70.
Duan X X, Gao S Y, Gu Y F, et al. Study on reinforcement mechanism and frictional wear properties of 316L-SiC mixed layer deposited by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 62-70.

[124] 汪红所,邓德伟,孙家骏,等.NbC和WC添加量对激光熔覆Stellite6合金涂层组织和性能的影响[J].机械工程材料,2025,49(2):92-97.
Wang H S, Deng D W, Sun J J, et al. Effect of NbC and WC addition on microstructure and properties of laser cladding Stellite6 alloy coating[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2025, 49(2): 92-97.

[125] 管文虎,孙文磊,郭歆雨,等.碳化钨对316L不锈钢表面激光熔覆钴基涂层性能的影响[J].应用激光,2025,45(11):22-30.
Guan W H, Sun W L, Guo X Y, et al. Effect of WC on the properties of laser cladding cobalt-based coatings on 316L stainless steel surfaces[J]. Applied Laser, 2025, 45(11): 22-30.

[126] 董逸君,王勇刚,李东亚,等.激光熔覆碳化物增强镍基涂层组织与性能的热处理调控[J].焊接学报,2024,45(10):59-68.
Dong Y J, Wang Y G, Li D Y, et al. Heat treatment tailoring of microstructure and properties of laser cladding carbide reinforced nickel based coatings[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(10): 59-68.

[127] 雍耀维,傅卫,张翔,等.原位生成WC/TaC复合激光熔覆层组织研究[J].稀有金属材料与工程,2017,46(11):3176-3181.
Yong Y W, Fu W, Zhang X, et al. *In-situ* synthesis of WC/TaC reinforced nickel-based composite alloy coating by laser cladding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(11): 3176-3181.

[128] 龙海洋,董真,卢冰文,等.WC含量对激光熔覆FeCoNiCr高熵合金涂层组织结构及性能的影响规律研究[J].中国激光,

2023,50(24):2402206.
Long H Y, Dong Z, Lu B W, et al. Influence of WC content on microstructure and properties of laser-cladded FeCoNiCr high-entropy alloy coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(24):2402206.

[129] 刘玉璠,焦俊科,徐子法,等.激光熔覆制备TiC增强Ni-30Fe-20Al复合材料的组织与性能研究[J].航空制造技术,2021,64(12):53-60.
Liu Y F, Jiao J K, Xu Z F, et al. Microstructures and properties of TiC reinforced Ni-30Fe-20Al composite prepared by laser cladding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(12):53-60.

[130] 刘鹏宇,李辉,张瑞华,等.激光熔覆TiC颗粒增强Fe基梯度涂层的耐磨性能[J].稀有金属材料与工程,2024,53(3):632-642.
Liu P Y, Li H, Zhang R H, et al. Wear resistance of laser cladding TiC particle-reinforced Fe-based gradient coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(3):632-642.

[131] Gao X S, Tian Z J, Liu Z D, et al. Interface characteristics of Al_2O_3-13%TiO_2 ceramic coatings prepared by laser cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(10):2498-2503.

[132] 黄皓天,田富强,仝永刚,等.$Cr_{12}MoV$模具钢表面TiC-Ni60熔覆层的显微组织与耐磨性能研究[J].材料保护,2025,58(5):91-99.
Huang H T, Tian F Q, Tong Y G, et al. Microstructure and wear resistance of TiC-Ni60 cladding layer on $Cr_{12}MoV$ die steel[J]. Materials Protection, 2025, 58(5):91-99.

[133] 钱华丽,晁明举,李志华,等.原位生成TaC-NbC增强镍基激光熔覆层[J].金属热处理,2011,36(10):34-38.
Qian H L, Chao M J, Li Z H, et al. *In-situ* synthesis of TaC-NbC reinforced Ni-based coatings by laser cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(10):34-38.

[134] 李祺祺,温耀杰,张百成,等.梯度功能合金的增材制造技术研究进展[J].机械工程学报,2021,57(22):184-200.
Li Q Q, Wen Y J, Zhang B C, et al. Research progress of functional graded alloy prepared by additive manufacturing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22):184-200.

[135] 戈晓岚,许晓静,蔡兰,等.SiC_p含量和尺寸对Al基复合材料摩擦学特性的影响[J].中国有色金属学报,2005,15(3):458-462.
Ge X L, Xu X J, Cai L, et al. Effect of grain size and content of SiC_p on tribology characterization of SiC_p/Al composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(3):458-462.

[136] 刘守法,周兆锋.第二相增强金属基复合材料研究进展[J].热加工工艺,2018,47(4):14-16.
Liu S F, Zhou Z F. Research progress on secondary phase-reinforced metal matrix composite[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(4):14-16.

[137] 马腾飞,王玉鹏,荣光飞,等.微纳米颗粒增强TiAl基复合材料组织与室温力学性能[J].稀有金属材料与工程,2023,52(5):1877-1884.
Ma T F, Wang Y P, Rong G F, et al. Microstructure and mechanical properties of micro-nano particles reinforced TiAl matrix composites at room temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(5):1877-1884.

[138] Zhao S B, Luo G F, Yang L J, et al. Laser additive remanufacturing Ni-based multilayers reinforced with dual-scale tungsten carbides via a novel integrated strategy[J]. Additive Manufacturing, 2024, 84:104146.

[139] 李鹏宇,董会,张永杰,等.激光熔覆316L/双尺度SiC复合涂层的结构与摩擦磨损性能[J].金属热处理,2025,50(9):39-47.
Li P Y, Dong H, Zhang Y J, et al. Microstructure and friction-wear properties of 316L/double-scale SiC composite coating by laser cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(9):39-47.

[140] Zhou J L, Cheng Y H, He B, et al. Enhancement of high-entropy alloy coatings with multi-scale TiC ceramic particles via high-speed laser cladding: microstructure, wear and corrosion[J]. Applied Surface Science, 2025, 685:162061.

[141] 房刘杨,姚延松,闫华,等.铜合金表面激光熔覆TiB_2增强镍基梯度涂层[J].中国激光,2017,44(8):802001.
Fang L Y, Yao Y S, Yan H, et al. TiB_2 reinforced Ni-based gradient coating on copper alloy surface by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8):802001.

[142] 魏增敏,张永忠,高士友,等.激光快速成形技术的发展及其在功能梯度材料制备上的应用[J].材料导报,2005,19(5):77-80.
Wei Z M, Zhang Y Z, Gao S Y, et al. The development of laser direct metal deposition and its application in fabricating functional gradient material[J]. Materials Review, 2005, 19(5):77-80.

[143] 张百成,王泳翔,曲选辉.基于增材制造的异种金属一体化成形关键问题[J].航空制造技术,2023,66(18):36-50.
Zhang B C, Wang Y X, Qu X H. Key issues of integrated forming of dissimilar metals based on additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(18):36-50.

[144] 丁立红,雷卫宁,陈菊芳.激光熔覆增材制备45/316L/CuSn5梯度层的界面缺陷抑制及性能优化[J].材料工程,2026,54(1):139-149.
Ding L H, Lei W N, Chen J F. Interface defect suppression and performance optimization of 45/316L/CuSn5 gradient layer prepared by laser cladding additive manufacturing[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(1):139-149.

[145] 张旭东,赵梓钧,曾琦,等.激光熔融沉积钛合金-镍基高温合金异种材料界面冶金控制[J].航空材料学报,2021,41(3):139-147.
Zhang X D, Zhao Z J, Zeng Q, et al. Interface metallurgical control of laser melting deposited titanium alloy-nickel-based superalloy dissimilar material[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(3):139-147.

[146] Lin X, Yue T M, Yang H O, et al. Laser rapid forming of SS316L/Rene88DT graded material[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 391(1/2):325-336.

[147] 姚讯杰,朱言言,韩曦,等.基于铜合金表面预处理的激光增材制造铜/镍异种金属制备研究[J].中国激光,2025,52(4):0402301.
Yao X J, Zhu Y Y, Han X, et al. Preparation of copper/nickel dis-

similar metals by laser additive manufacturing based on copper alloy surface pretreatment[J].Chinese Journal of Lasers,2025,52(4):0402301.

[148] 张永忠,席明哲,石力开.激光熔覆沉积制备多层316L不锈钢-Stellite31合金梯度功能材料[J].金属热处理,2007,32(9):45-47.
Zhang Y Z,Xi M Z,Shi L K.Multi-layer functional gradient materials of 316L stainless steel to stellite 31 alloy prepared by laser clad deposition[J].Heat Treatment of Metals,2007,32(9):45-47.

[149] 李纯,罗镇霆,乐国敏,等.Cu中间层对钢/钛异种材料激光增材制造连接界面的组织演变影响[J].特种铸造及有色合金,2024,44(11):1447-1453.
Li C,Luo Z T,Le G M,et al.Influence of Cu interlayers on microstructe evolution of steel/titanium dissimilar interfaces by laser additive manufacturing[J].Special Casting & Nonferrous Alloys,2024,44(11):1447-1453.

[150] 张敏,王新宝,王浩军,等.激光熔覆TC4/Inconel 625/316L不锈钢梯度材料组织与性能[J].焊接学报,2023,44(7):16-23.
Zhang M,Wang X B,Wang H J,et al.Microstructure and mechanical properties of laser cladding TC4/Inconel 625/316L stainless steel gradient material[J].Transactions of the China Welding Institution,2023,44(7):16-23.

[151] Zhao H,Zhao C,Xie W,et al.Research progress of laser cladding on the surface of titanium and its alloys[J].Materials,2023,16(8):3250.

[152] 衡钊,舒林森.激光功率对27SiMn钢激光熔覆力学性能的影响[J].中国激光,2022,49(8):0802011.
Heng Z,Shu L S.Effect of laser power on mechanical properties of laser cladded 27SiMn steel[J].Chinese Journal of Lasers,2022,49(8):0802011.

[153] 吴多利,吴昊天,孙珲,等.激光熔覆高温防护涂层研究现状及发展方向[J].中国腐蚀与防护学报,2023,43(4):725-736.
Wu D L,Wu H T,Sun H,et al.Research status and development of laser cladding high temperature protective coating[J].Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2023,43(4):725-736.

[154] 宋晓蕾.基于激光熔覆TiC/TiB_2的钛合金表面组织及性能研究[J].粉末冶金工业,2022,32(1):64-68.
Song X L.Study on surface microstructure and properties of titanium alloy based on TiC/TiB_2 laser cladding[J].Powder Metallurgy Industry,2022,32(1):64-68.

[155] 孙荣禄,牛伟,雷贻文,等.钛合金表面激光熔覆TiB_2-TiC/Ni复合涂层的真空摩擦磨损性能[J].材料热处理学报,2012,33(5):131-135.
Sun R L,Niu W,Lei Y W,et al.Tribological properties in vacuum of TiB_2-TiC/Ni laser clad layer on titanium alloy substrate[J].Transactions of Materials and Heat Treatment,2012,33(5):131-135.

[156] 张煜,娄丽艳,徐庆龙,等.超高速激光熔覆镍基WC涂层的显微结构与耐磨性能[J].金属学报,2020,56(11):1530-1540.
Zhang Y,Lou L Y,Xu Q L,et al.Microstructure and wear resistance of Ni-based WC coating by ultra-high speed laser cladding[J].Acta Metallurgica Sinica,2020,56(11):1530-1540.

[157] 曹赛男.激光熔化沉积TiC/Ni基高温合金:工艺调控机制及跨尺度增强效应[D].南京:南京航空航天大学,2017.
Cao S N.Laser melting deposition of TiC/Ni-based superalloys:process control mechanism and cross-scale enhancement effect[D].Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2017.

[158] 刘庆伟,胡家齐,范朝,等.铝合金表面激光熔覆材料研究现状与展望[J].粉末冶金工业,2025,35(1):127-137.
Liu Q W,Hu J Q,Fan Z,et al.Recent trends and prospect of laser cladding materials on the surface of aluminum alloy[J].Powder Metallurgy Industry,2025,35(1):127-137.

[159] 汪新衡,钱书琨,刘安民,等.铝合金表面添加稀土激光熔覆Ni基WC金属陶瓷涂层研究[J].热加工工艺,2014,43(4):126-129.
Wang X H,Qian S K,Liu A M,et al.Study on Ni-based WC ceramic coating adding laser cladding rare earth on Al alloy surface[J].Hot Working Technology,2014,43(4):126-129.

[160] 李洪波,郭猛,王琳,等.H13/Ni/WC混合粉末梯度熔覆层的激光熔覆制备及耐磨性研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(3):0314006.
Li H B,Guo M,Wang L,et al.Laser cladding preparation and wear resistance of H13/Ni/WC hybrid powder gradient cladding layer[J].Laser & Optoelectronics Progress,2021,58(3):0314006.

[161] 郭昱,张英乔,张涛,等.AZ91D镁合金表面激光熔覆Al/Zr+B_4C/Y_2O_3复合涂层组织与性能研究[J].表面技术,2018,47(1):176-180.
Guo Y,Zhang Y Q,Zhang T,et al.Microstructures and properties of laser cladding Al/Zr+B_4C/Y_2O_3 composite coatings on AZ91D magnesium alloys[J].Surface Technology,2018,47(1):176-180.

[162] 高亚丽,路鹏勇,刘宇,等.镁合金表面激光熔覆研究现状[J].中国表面工程,2023,36(3):22-39.
Gao Y L,Lu P Y,Liu Y,et al.Research status of laser cladding on magnesium alloy[J].China Surface Engineering,2023,36(3):22-39.

基金项目:国家重点研究计划重点专项(2023YFB4606600)
收稿日期:2026-05-08;**录用日期**:2026-07-03
通讯作者:董世运(1973—),男,研究员,博士,主要从事金属材料、激光熔覆、增材制造/再制造及无损检测评价等方面研究,联系地址:北京丰台杜家坎21号(100072),E-mail:syd422@vip.sohu.com

(本文责编:齐书涵)