

钛基表面改性用陶瓷-高熵合金复合涂层的研究进展

冯 谦¹ 杨子建¹ 冯志浩^{1,2} 路天宇¹ 马 静¹ 王建刚¹ 胡海洋¹ 邸宇飞¹ 李建辉¹

(1. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北省短流程炼钢技术创新中心, 石家庄 050018; 2. 巨力索具股份有限公司, 保定 072550)

摘 要 钛合金凭借高比强度、低热膨胀系数和密度优势, 在精密器械领域应用日益广泛, 但在极端工况下的表面耐磨耐蚀性能亟待提升。基于多元组分协同效应的高熵合金涂层的综合性能显著优于传统涂层体系, 但其单一的固溶体结构引发的强塑性失衡制约了工程应用。引入具备优异特性的陶瓷增强相, 可有效弥补高熵合金的力学缺陷, 使复合涂层兼具金属韧性与陶瓷刚性, 从而适应高温、强腐蚀等极端工况。综述了钛基高熵合金-陶瓷复合涂层的最新研究进展, 总结了在钛基表面制备高熵合金涂层的工艺方法, 并介绍了陶瓷增强相的添加方式和种类及其对涂层性能的影响。最后, 指出该领域存在的不足并对重点方向进行了展望。

关键词 钛合金; 高熵合金涂层; 表面改性; 陶瓷增强相

中图分类号 TG174.4; G353.11

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250073

Research Progress in Ceramic-HEA Composite Coatings for Surface Modification of Titanium Matrix

FENG Qian¹, YANG Zijian¹, FENG Zhihao^{1,2}, LU Tianyu¹, MA Jing¹, WANG Jiangang¹, HU Haiyang¹,

DI Yufei¹, LI Jianhui¹

(1. Hebei Short Process Steel Making Technology Innovation Center, School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018; 2. Juli Rigging Co., Ltd., Baoding 072550)

Abstract: Titanium alloys are widely used in the field of precision instruments due to their high specific strength, low thermal expansion coefficient and density, while the surface wear and corrosion resistance in extreme environments needs to be improved urgently. The comprehensive performance of HEA coatings based on synergistic effect of multiple components is superior to that of traditional coating systems, while the imbalance of strength and plasticity induced by single solid solution structure restricts engineering applications. The introduction of ceramic reinforcements with excellent properties can effectively compensate for mechanical defects of HEAs, endowing composite coating with both toughness and ceramic rigidity to adapt to extreme environments such as high temperature and highly corrosive conditions. The latest research progress in titanium-based HEA-ceramic composite coatings was reviewed, and the preparing methods of HEA coatings on titanium-based surfaces were summarized. The addition modes and types of ceramic reinforcements as well as the effects of various reinforcements on properties of coatings were introduced. Finally, the shortcoming in the field was presented and key directions were prospected.

Key Words: Titanium Alloys, High Entropy Alloy Coating, Surface Modification, Ceramic Reinforcement

钛合金凭借较高的强度、较低的热膨胀系数和良好的生物相容性受到了广泛关注, 其研发制备体系相对完善, 因而在航空航天、医疗器械和人工智能等诸多领域中得到大量运用。然而, 钛合金硬度不足、摩擦磨损性能较低且耐化学腐蚀能力差, 无法在极端环境条

件下长期服役, 限制了其在工业领域中的应用^[1-4]。

高熵合金(High-entropy alloys, HEAs)凭借其独特的四大效应, 能够有效抑制结构成分复杂的金属间化合物析出, 而高混合熵可促使多元组分形成具有不同晶体结构的稳定的固溶体, 通过多种元素特性协同调

收稿日期: 2025-02-20; 修订日期: 2025-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52001109); 河北省自然科学基金资助项目(E2024208012); 河北省燕赵黄金台聚才计划骨干人才资助项目(B2024005025); 2024年度河北省引进国外智力资助项目(231080479A); 石家庄市科技计划资助项目(241110537A)

第一作者: 冯谦, 男, 1999年出生, 硕士研究生, E-mail: 1917025404@qq.com

引用格式: 冯谦, 杨子建, 冯志浩, 等. 钛基表面改性用陶瓷-高熵合金复合涂层的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(5): 672-685.

FENG Q, YANG Z J, FENG Z H, et al. Research progress in ceramic-HEA composite coatings for surface modification of titanium matrix[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 672-685.

控,实现综合性能指数对钛合金基材的系统性超越^[5-6]。然而,高熵合金的制备成本高昂,不足以取代钛合金的优势地位。HEAs涂层是基于高混合熵理论研发的新型表面技术材料,其相结构演变机制继承了高熵合金热力学特征,兼具优异综合性能,是表面工程领域的重要创新,在保持了HEAs优异性能的同时降低了合金成本。因此,通过表面改性技术来制备以钛合金为基体的HEAs涂层以提高其综合性能成为研究热点^[7-13]。随着表面工程技术的迭代发展,钛基HEAs涂层的制备逐步形成涵盖物理沉积、喷涂及激光强化三大分支的工艺体系^[14-16]。在物理沉积领域,溅射技术通过调节靶材成分和溅射参数已可实现纳米晶/非晶复合结构的可控构筑,形成的典型涂层厚度和孔隙率都比较优异。但磁控溅射受限于固有的低沉积效率及靶材利用率不足问题,使其在厚度 $>500\text{ }\mu\text{m}$ 的功能涂层领域的工程化应用难以进行,需结合多靶共溅或梯度过渡层设计以优化界面结合性能^[17]。喷涂技术通过优化送粉速率、射流速度及基体预热温度等参数,可在钛合金基体表面构建一定厚度的HEAs功能涂层,其原料利用率和制备效率高。但其难以进行大曲率复杂构件成形的缺陷限制了其进一步发展,未来可结合工业机器人技术突破这一局限性^[18]。激光表面改性技术中,同步送粉式激光熔覆通过调控激光功率、扫描速度及搭接率等熔覆参数,能够在钛合金基体表面实现与HEAs涂层的冶金结合,具备结合强度高、孔隙率低及高温稳定性良好的独特优势,为航空发动机等热端部件的长寿命防护提供了技术储备^[19]。

在航空航天、石油化工和核能发电等高附加值行业中,材料在极端环境下服役要求要更高。相比之下,钛基HEAs涂层同样存在耐摩擦磨损和抗高温氧化等性能不满足要求,严重阻碍了钛基HEAs涂层在这些领域中的广泛使用^[20-21]。随着特殊行业对其使用的关键零部件性能要求的不断提高,在保留钛基HEAs涂层优异的高温力学性能基础上优化改善其他性能成为了关键问题。

陶瓷材料因具有熔点高、强度大、热导率低、热膨胀系数小等特点被视为提升传统合金涂层力学与物理性能的优异材料^[22-23]。相对于传统Ti基涂层,陶瓷颗粒增强HEAs复合涂层的独特优势可归纳为:①多主元协同强化效应主导的相结构设计,不仅避免脆性金属间化合物,且与钛基体的热膨胀系数等物理特性更匹配,降低界面应力。②引入TiC、WC等陶瓷颗粒,通过第二相强化、晶界钉扎及载荷传递机制,有效平衡固溶体涂层的强度-塑性矛盾。③复合涂层在极端环境(如 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温、强腐蚀介质)中表现出显著强化的热稳定

性与耐蚀性,拓展了传统表面涂层的工程应用边界^[24-28]。通过表面改性技术在机械零部件表面制备陶瓷颗粒增强HEAs复合涂层,对于延长关键零部件寿命、提高资源利用率、节约稀有贵金属材料具有积极意义。在钛基陶瓷增强HEAs复合涂层制备领域中,陶瓷增强相的添加量、添加方式和种类成为研究热点^[29-31]。

基于此,对钛基HEAs涂层中引入陶瓷增强相领域的最新研究进展进行了综述。首先简要介绍在钛合金表面制备HEAs涂层的工艺方法,包括溅射沉积技术(Sputter deposition technology, SDT)、喷涂技术(Spraying techniques, ST)、激光表面改性技术(Laser surface modification technology, LSMT)和电化学沉积技术(Electrochemical deposition technology, EDT)等。然后介绍陶瓷增强相的添加方式、添加种类,重点介绍其对涂层各类性能的影响与作用。最后,指出目前存在的不足并对重点研究方向进行了展望。

1 钛基HEAs涂层表面改性制备工艺

溅射沉积技术是利用物理手段在真空或低压气体环境中将材料源离解为气态原子/离子,通过能量场迁移至基体表面形成涂层的工艺,可沉积的材料范围非常广泛,除金属外,还可沉积化合物、高聚物和陶瓷等多种涂层。喷涂技术是利用离心力等压力将涂层材料粉末分解为成分均匀的细小液滴,进而涂敷到基体材料表面上的方法。激光表面改性主要包括熔覆法和合金化法,是指利用高功率、大能量密度的激光束,通过快热、快冷的加热方式来改变材料表面的结构,使材料的力学及特殊性能发生变化的技术。研究表明^[32-34],沉积温度、气体流量等制备参数以及磁控溅射、化学气相沉积等制备工艺的选择都显著影响涂层的致密度、结合强度和性能差异,优化参数及工艺可提升涂层质量与耐磨性。

1.1 溅射沉积技术

溅射沉积技术是目前制备钛基HEAs涂层常用的方法之一,包括磁控溅射(Magnetron sputtering, MS)和反应溅射(Reactive sputtering, RS)^[35-36],以MS使用最为普遍,其工艺流程原理见图1。其原理主要是利用电离出的高能粒子 Ar^+ 来轰击靶材表面,使得靶材表面原子脱离,同时在电场和磁场共同作用下加速移动、积累能量,最终在基体表面沉积形成涂层。该方法的优点是可选材料广泛、工艺灵活性高、形成涂层的纯洁度优异且涂层成膜速率高。过程中可通过调节工艺参数影响涂层的微观形貌和晶体结构来提升其力学性能,包括溅射时间、溅射功率、沉积温度和溅射气氛等^[37-40]。

MS 工艺对涂层的厚度灵活可控,较高的冷却速度能抑制晶粒粗化,对涂层力学性能产生影响。但制备的试样界面结合方式为机械结合,故界面结合强度低且高溅射功率会引入微裂纹并增加了残余应力^[41-42]。制备的高熵合金涂层具有优异的显微硬度与耐磨性,但其强韧性协同效应较差,且在一些极端环境中(如酸性等)因晶界选择性腐蚀导致钝化膜失效难以满足服役要求^[43]。目前 MS 工艺主要用于高敏器件表面防护和微电子封装等领域,但由于 MS 工艺制备 HEAs 涂层存在的靶材利用率低、纯度要求严苛且涂层与基体间附着力较差等问题^[44-45],导致其在大规模应用方面依然具备一些缺陷。未来可结合梯度共溅射技术,在表层引入 FCC 结构韧性相,通过位错滑移机制提升韧性,以兼顾强韧性与耐磨性。

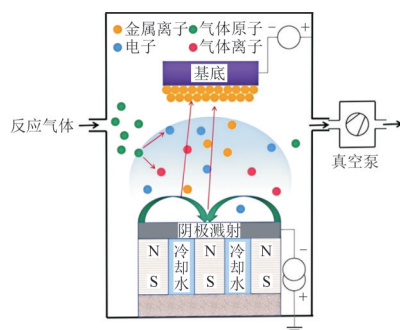


图1 磁控溅射工艺原理示意图^[35]

Fig.1 Schematic diagram of magnetron sputtering process principle^[35]

1.2 喷涂技术

喷涂技术是利用喷枪或雾化装置将材料通过高速气流雾化成微米级颗粒,并沉积于基体表面形成功能性涂层。该方法能制备具有优异力学性能、耐腐蚀性及理化特性的涂层,通过参数调控(如粒子临界速度)实现高性能 HEAs 涂层。冷喷涂、等离子喷涂等技术可避免材料高温氧化,适用于纳米晶、非晶等敏感材料的涂覆。制备 HEAs 涂层的喷涂技术主要包括热喷涂(Thermal spraying, TS)和冷喷涂(Cold spraying, CS)^[39-40],其工作原理见图2,特点见表1。

TS 技术是以电弧、等离子弧或火焰为热源,将金属或非金属材料加热至熔融或半熔融状态后,通过高速气流喷射至预处理基体表面形成高性能涂层的表面改性方法。在钛基 HEAs 涂层制备中,该技术表现出典型层状沉积结构及显著工程优势:①沉积速率远超磁控溅射技术,同时兼具喷涂材料多元化的特点,可适配陶瓷、金属间化合物及 HEAs 等多类体系^[48-49]。②设备投资与运维成本较激光熔覆技术低廉,适用于大尺寸构件的高效表面处理。基于此,该技术在航空发动机

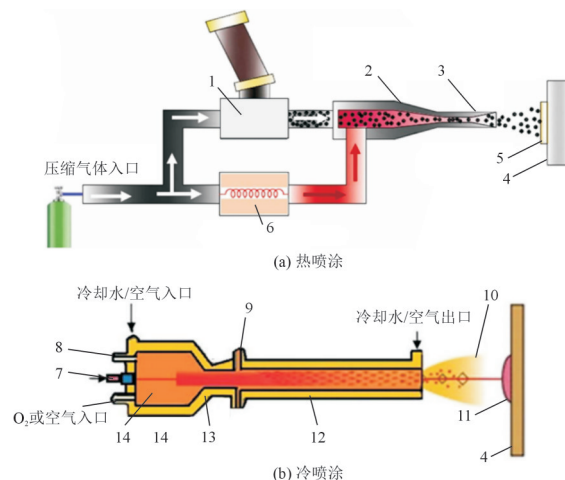


图2 喷涂工艺原理示意图^[46-47]

Fig.2 Schematic diagram of spraying process principle^[47]

1. 送粉器 2. 气体/粉末混合舱 3. 超音速喷嘴 4. 基体 5. 喷涂沉积
6. 电加热器 7. 火花塞 8. 燃料气体 9. 原料粉末 10. 加速粒子
11. 涂层 12. 枪筒 13. 喷嘴 14. 燃烧室

涡轮叶片高温防护、石油输送管道耐蚀涂层的规模化生产中具有不可替代的经济性优势^[50]。然而,传统热喷涂工艺的结构缺陷限制了其在高性能场景中的拓展应用。熔滴逐层堆积形成的层状易诱发界面未熔合缺陷,导致孔隙率较基体增加了2.5~4倍,并形成亚表面微裂纹网络,显微硬度与中性盐雾腐蚀寿命的显著降低。此外,喷涂过程中高温焰流易引发钛基 HEAs 中活性元素(如 Al、Cr)的氧化质量损失,不仅损害固溶体稳定性,还会生成硬脆金属间化合物,削弱界面结合强度(典型大气等离子喷涂体系结合强度仅20~30 MPa^[51-52])。为突破瓶颈,研究者提出了两类技术策略:通过激光重熔对涂层进行后处理可使孔隙率降至0.2%~0.5%,同时实现晶粒细化,显微硬度显著提升;通过调控喷涂反应参数原位生成 TiB₂、Al₂O₃ 等陶瓷相,可在保持沉积速率的条件下,将界面结合强度优化至180~220 MPa,并使复合涂层的800℃高温磨损率降至新低^[51]。尽管需克服界面结合强度和高温氧化等问题,TS 技术凭借其毫米级厚涂层快速制备能力与成本效率优势,仍在重型装备复杂曲面强化等领域占据重要地位。

CS 技术是一种在低温环境下采用高速运动颗粒动能沉积机制的表面涂层制备方法,其核心工艺在于通过高压气体将微米级粉末颗粒加速至超音速状态^[53]。CS 工艺虽以机械结合为主,但其超音速粒子沉积过程中产生的高应变率塑性变形可诱导动态再结晶,促使涂层形成细晶致密组织,从而协同提升力学性能与耐环境侵蚀能力。然而,该工艺受限于沉积效率不足及曲面适配性下降等固有缺陷^[54-56],制约了航空压

气机叶尖等精密构件表面功能涂层的可靠性构筑。未来需通过气体介质优化与沉积动力学调控实现工艺突破,拓展其在高端装备领域的工程化应用场景。

相较于传统热喷涂技术,CS技术的非热源特性(最高温度<600℃)有效避免了材料相变和氧化物的生成,特别适合易氧化金属(如Mg、Al基高熵合金)的沉积,显著提升了涂层的结构致密性与缺陷控制水平^[57]。然而,该技术需使用较细粒径粉末,制造成本显著高于热喷涂技术,且对复杂形状的沉积效率偏低。尽管如此,冷喷涂仍广泛应用于精密电子元件和生物医用植入物等对氧化敏感、尺寸精度要求严苛的领域,是低热负荷表面功能化的重要技术选择^[58-60]。

表1 喷涂技术特点总结^[47-52, 58-60]

Tab.1 Characteristic summary of spraying technology types^[47-52, 58-60]

喷涂技术	优点	缺点
热喷涂	应用成本低 应用范围广 对基体伤害小	结合强度低 材料利用率低 均匀性差 孔隙率高
冷喷涂	环保性高 致密度高 喷涂速度快	应用成本高 设备噪音大 喷涂定向性差

1.3 激光表面改性技术

激光表面改性技术是一类基于光热转换原理的表面强化工艺,其核心机理是通过高功率密度激光束在毫秒至微秒级时间内实现基体材料表面快速加热与冷却。该技术采用非接触式热源,通过精准控制激光参数(功率、扫描速度、光斑尺寸)可在材料表面形成梯度温度场,驱动涂层元素发生扩散、熔融及冶金反应,最终借助基体自传导冷却形成强化层。典型工艺包括激光表面合金化、激光熔覆、激光淬火等,具有能量密度高、低原料消耗、工艺灵活性高等技术优势^[61-63]。

激光表面合金化(Laser surface alloying, LSA)与激光熔覆(Laser cladding, LC)是制备HEAs涂层最为常见的两种激光加工方法。LSA是通过同步辐照预置合金粉末与基体,在熔池对流作用下实现元素互扩散,形成化学组成可控的新型合金表层的表面改性技术^[47]。这种技术会使基体材料表面的化学成分、微观结构和相组成均发生改变,从而使得廉价基材获得更加优异的表面性能^[64]。该工艺通过原位冶金反应在钛基体表面形成一定厚度的成分渐变层,可以有效缓解界面热应力,同时消除预置粉末与基体的孔隙缺陷,制备涂层的高温强度和耐腐蚀性也非常优异,但仍需精准控制元素扩散深度,以避免基体过度稀释导致涂层性能下降。

LC技术采用同轴送粉或预置粉末方式,通过优化熔覆参数(稀释率<5%)构建与基体呈梯度冶金结合的HEAs涂层,其独特的多主元固溶体结构使涂层硬度与高温稳定性获得同步提升^[65],工作原理示意图见图3。不同于LSA技术以基体材料为溶剂来形成新的合金层,LC技术是以新加入的合金粉末为基,基体熔化的薄层只是起到冶金结合的作用,这也凸显了激光熔覆形成涂层的基体稀释率低且具备冶金结合的独特优势^[66]。LC工艺通过激光束原位合金化在钛基体表面形成冶金结合界面,其共格结构可显著提升界面剪切强度,高于传统热喷涂的效果^[67]。高能激光的快速冷却抑制动态再结晶,使涂层晶粒显著细化,孔隙率相比其他工艺制备的涂层降至新低,且具有较好的极端环境稳定性和抗疲劳性,但其残余热应力较大,裂纹萌生概率上升^[68-69]。该工艺通过调控激光能量密度可平衡组织-应力矛盾,为航空发动机叶片等极端工况部件制造提供新途径。

激光表面改性技术的突出优势在于超高的界面结合强度,为电弧喷涂的10倍,可满足齿轮、轴承等高载荷部件的严苛要求,同时极快的冷却速率促使纳米晶/非晶结构生成,显著提升涂层硬度等力学性能^[70]。但激光高热输入容易引发基体热影响区,导致变形从而需后续加工,高功率激光器的高昂造价成本也为该工艺在高熵合金涂层制备领域的大规模推广造成影响^[71]。然而,该技术在高强耐磨涂层(模具钢、航空航天结构件)及梯度功能涂层(如热障涂层)领域仍具有不可替代性^[72],是精密部件高性能表面改性的前沿解决方案。

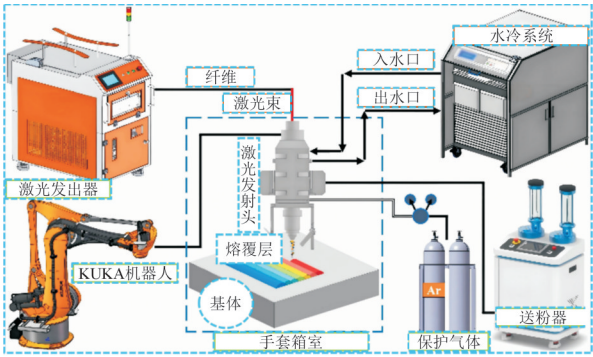


图3 激光熔覆工艺原理示意图^[66]

Fig.3 Schematic diagram of laser cladding process principle^[66]

1.4 其他表面改性方法

近年来,电弧喷涂、电化学沉积等技术也被应用于HEAs涂层的制备及其表面改性,并取得了一定的成果。电化学沉积法利用电解液中金属离子的定向还原形成金属镀层,其突出优势体现在低温加工体系(25~80℃)与三维结构的高适配性,即既能避免传统热加工

对聚合物基材的热应力损伤,又可在复杂微结构内实现均匀沉积。然而,该工艺受限于电极反应的选择性控制,易导致合金成分偏离且需依赖于基底的导电性,因此主要应用于微电子器件互连和轻量化复合材料表面金属化(如汽车内饰功能镀层)等领域^[73-75]。YOUSEFAN F等^[74]采用脉冲电沉积法制备了Co-Cr-Fe-Mo-Ni HEAs涂层,其为FCC单一固溶体结构,成分组成和表面形貌取决于所施加的脉冲参数,耐腐蚀性能明显优于基体。相较而言,电弧喷涂通过电弧熔融金属丝材并依托高速气流雾化沉积,展现出显著的经济性与兼容性优势,运行成本仅为激光工艺的10%,可直接加工高熔点金属粗粉,适用于大面积快速施工。但该工艺因氧化剧烈、孔隙率高及界面结合弱等固有缺陷使得涂层力学性能受限,故常作为低成本解决方案用于海洋防腐工程与机械设备轴类零件的磨损修复,满足非高载荷场景的防护需求^[76-78]。BELLO Z A等^[76]利用高速电弧喷涂制备了Al-Co-Cr-Fe-Ni-Si系HEAs涂层,分析了不同温度热处理下的显微组织、相组成和力学性能的变化。结果表明,涂层中除FCC相外,还含有AlNi、Fe₃Ni₂、Cr₂Ni₃等硬质金属间化合物相,并在500℃时表现出最佳的耐磨损性能。

2 钛基陶瓷颗粒增强HEAs复合涂层的研究现状

2.1 钛基HEAs涂层的选用体系

随着传统钛合金在先进制造、航空航天及能源装备等新兴高端领域的服役环境中逐渐显露出性能局限性(如高温强度不足、抗氧化/耐蚀性衰退、摩擦学性能劣化等),针对其表面性能改性的基础研究与工程应用探索已成为材料科学领域的重要前沿方向。近年来,基于高熵设计理念开发的钛基表面改性强化涂层取得了突破性进展,目前已形成了过渡金属基高熵合金涂层(Transition metal-based HEAs coatings)、轻质金属基高熵合金涂层(Light weight HEAs coatings)、难熔金属基高熵合金涂层(Refractory HEAs coatings)和陶瓷增强高熵合金复合涂层(Ceramic-reinforced HEAs coatings)四大典型体系^[79-82]。其中,以Co-Cr-Fe-Ni系元素为主导的过渡金属基HEAs涂层因多主元近等摩尔比设计和高混合熵效应展现出了独特的固溶强化与晶格畸变特性,成功抑制金属间化合物生成并提升了涂层的热稳定性,又因其FCC相为主导的微观结构使涂层兼具高强度与高延展性,力学性能较传统钛合金获得了显著提升^[83]。因此,该类涂层在航空发动机压气机叶片、抗Cl⁻点蚀海洋工程装备及生物相容性植入

器件等服役环境中展现出了独特优势。然而,温度超过800℃时,FCC相动态回复导致材料发生显著软化,同时Cr₂O₃防护膜的劣化也会引发高温抗氧化性能衰退。此外,基于激光熔覆技术的快速凝固过程工艺特点易诱发Ni/Co的晶界偏析,导致微裂纹和孔隙率升高,限制了该体系在高温环境中的应用^[84-86]。

基于高熔点金属元素(如W、Mo、Ta、Nb、Hf等)构筑的难熔HEAs涂层体系,是面向超高温极端工况设计的前沿材料系统。该体系的核心策略在于利用难熔金属的高熔点与高熵理念设计的热力学稳定性,通过多主元协同固溶构建BCC相主导结构,从而提高其固溶强化度与耐高温性能^[87-89]。相比过渡金属基HEAs涂层体系而言,难熔HEAs涂层体系在超过1200℃的高温环境下的材料强度、抗氧化和耐辐照性取得了明显提升,这使其在火箭推进器喉衬、聚变堆第一壁装甲和高温熔盐反应堆腐蚀防护等极端高温环境中仍能发挥其服役功能。但其独有的BCC相晶体结构有着较差的断裂韧性倾向,这使得该涂层体系的低温脆性增强,且由于其组成元素普遍为重金属元素,导致制备的涂层出现了高密度劣势,制约了航空航天领域对涂层要求的轻量化需求^[90-91]。

为实现实际工程环境中的轻量化需要,研究者开发出了一种以Al、Mg、Ti等低密度元素为核心的轻质HEAs涂层体系,该体系具备FCC+BCC的双相协同晶体结构,具备高强-塑性协同强化机制,该涂层相比其他HEAs涂层体系密度极低且其组元元素普遍可形成致密氧化膜,这显著提高了涂层的抗氧化性能,使其在航空航天、轨道交通领域具备了明显优势^[92-94]。但其中的FCC相固有的高温动态再结晶行为使涂层晶粒粗化导致强度骤降,且组元中活性元素居多,在Cl⁻介质环境中存在活性溶解倾向,限制了其在海水等酸性环境中的大规模应用^[95-96]。此外,还有一种以高熵合金为基体,通过引入较高硬度碳化物、氮化物或硼化物等陶瓷相,构建多尺度强化界面结构,旨在突破传统涂层材料硬度-韧性倒置限制的陶瓷增强HEAs复合体系,是面向高耐磨、抗高温氧化与极端载荷工况的颠覆性解决方案。由于其优异的超硬耐磨性、高温稳定性及耐辐照性能,使其在机械加工、能源装备和核能工业等领域具备明显优势,也是轻质HEAs涂层在耐磨工况下的补充解决方案^[97-99]。但界面脆性与高成本仍制约其规模化应用,若能改善这些缺点,随着极端工况对材料要求的提升,陶瓷增强HEAs复合涂层有望在精密加工与核能装备领域获得普遍应用^[100-101]。

2.2 陶瓷增强相的添加方式

激光熔覆制备的陶瓷增强钛基HEAs涂层复合材

料由陶瓷相与HEAs基体相构成。作为关键增强相,陶瓷相的含量、物化特性及形成方式共同决定涂层性能。适当提高陶瓷相含量可提升力学性能,但过量会导致脆性裂纹和剥落。当含量受限时,需通过优化陶瓷相特性及其生成方式提升性能。当前主要采用预制添加与激光原位合成两种工艺:前者通过预混陶瓷颗粒实现,但易出现界面结合弱化;后者借助激光能量促使元素反应生成原位陶瓷,可获得更均匀的相分布。研究表明,原位合成陶瓷相与基体的共格界面可使硬度提升25%~40%,同时保持良好的韧性^[102]。两种陶瓷颗粒引入方式见图4。

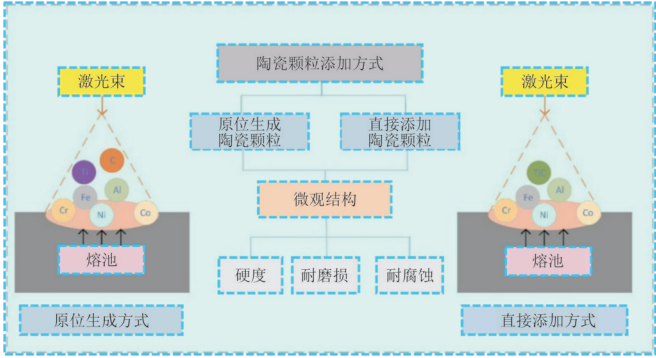


图4 陶瓷颗粒引入方法示意图^[102]

Fig.4 Schematic diagram of introduction method for ceramic particles^[102]

直接陶瓷相引入法通过将预制高熔点陶瓷颗粒(如TiC、SiC)与HEAs基体粉末进行机械预混,在激光熔覆过程中采用梯度能量输入和惰性气氛保护,可将陶瓷相分解率控制在15%以下,最终在涂层中形成体积分数一定的亚微米级硬质陶瓷增强相。该增强相通过第二相强化机制和载荷传递效应,使复合涂层的显微硬度和耐磨性得到显著提升,同时通过界面应力协调设计维持较高的塑性应变能力。研究表明,直接添加的陶瓷颗粒含量对熔覆层的力学性能有着直接影

响。XU L F等^[103]利用激光熔覆技术直接添加WC陶瓷颗粒制备了Al-Co-Cr-Fe-Ni-Ti/WC_x($x=0, 0.1, 0.2, 0.3$,质量分数,%)HEAs复合涂层。结果表明,涂层的相组成为典型的BCC相,但随着WC含量增加,熔覆层组织形貌随着添加WC含量的改变而越发致密,其力学性能也随之增加,强化机制可归因于WC粒子诱导的Hall-Petch效应与Orowan强化机制耦合作用。

原位生成陶瓷相是指通过外加的非金属和金属元素在激光束的高能量所产生的高温环境下相结合,根据混合焓和自由能等约束条件生成一种或多种陶瓷增强相的过程。与直接添加陶瓷颗粒方式相比,其优势在于新生成的陶瓷增强相可以均匀分布在HEAs涂层中,形成的复合涂层与基体的结合界面无污染且两者之间有着良好的冶金结合。HAO X H等^[104]采用激光熔覆工艺将Mo-Nb-Ta-W-Ti/(Si₃N₄)_x($x=0.5, 1.0, 1.5$ 和2.0,质量分数,%)熔覆在TC4合金上制备了陶瓷增强HEAs复合涂层。结果表明,在熔覆层中加入Si₃N₄陶瓷颗粒粉末后,涂层中会原位生成TiN和(Nb,Ti)₅Si₃两种陶瓷增强相,显著提高了复合涂层的硬度和耐磨性。此外,熔覆过程中Ti和N的结合属于放热反应,其与激光能量的复合会进一步促进HEAs涂层的合成。

2.3 陶瓷增强相的添加种类

钛基陶瓷颗粒增强高熵合金材料在保留钛合金基体优异理化特性的前提下,通过引入陶瓷增强相赋予其高硬度、耐磨性及高温抗蠕变-耐腐蚀协同特性,并通过晶界钉扎与第二相强化机制提升界面结合强度与高温承载能力,从而在先进制造装备领域展现出重要应用前景。对于HEAs涂层,陶瓷增强颗粒主要为氧化物、碳化物、硅化物、氮化物和硼化物。部分常见的陶瓷颗粒增强相的物理性能和熔覆特性见表2。

表2 HEAs复合涂层中常用陶瓷增强相的部分性质^[105-109]

Tab.2 Partial properties of ceramic reinforcements commonly used in HEAs composite coatings^[105-109]

陶瓷增强相		密度/(g·cm ⁻³)	熔点/K	热膨胀系数/(×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	弹性模量/GPa	熔覆特性
碳化物陶瓷	TiC	4.99	3 433	6.52~7.15(25~500℃)	440	提高硬度、耐磨性、降低粘着性
	WC	15.63	3 143	6.9	710	提高硬度、耐磨性
	SiC	3.19	2 970	4.63(25~500℃)	430	提高硬度、减少裂纹
氧化物陶瓷	TiO ₂	4.26	2 113	7.14	720	增强相变韧性、减少裂纹
	SiO ₂	2.2	1 994	0.5	30~70	减少裂纹、提升高温抗氧化性
	Al ₂ O ₃	3.9	2 327	7~8	254~380	减少裂纹、提升高温抗氧化性
	Cr ₂ O ₃	5.21	2 538	5.94	212	减少裂纹、提升高温抗氧化性
氮化物陶瓷	TiN	5.40	3 563	8.3	420	提高硬度、耐磨性
	BN	2.25	3 273	3.8	100~500	提高硬度、耐磨性
硼化物陶瓷	TiB	4.50	2 473	8.6	550	提高硬度、耐磨性、提升抗拉强度
	TiB ₂	3.97	3 253	4.6~8.10	500	提高硬度、耐磨性
硅化物陶瓷	TiSi ₂	4.35	1 813	0.5	127	提高硬度、耐磨性
	Ti ₅ Si ₃	4.32	2 403	—	200	提高硬度、耐磨性、提升高温抗氧化性

2.3.1 WC陶瓷颗粒增强相

WC陶瓷颗粒以其高硬度、高熔点、出色的耐磨性和优秀的热稳定性等特性,被广泛用作增强相材料^[110-112]。当前对WC陶瓷增强颗粒的研究主要围绕在原位分解后形成的晶体结构如何提升涂层性能方面展开。ZHANG H等^[113]通过高密度原位合成碳化物来强化Ni-Co-Fe-Cr-Ti-Mo HEAs涂层,采用外部添加WC陶瓷颗粒的方法来制备高密度的碳化物结构,借助高能量密度的激光束将WC近乎完全熔化。结果表明,形成的复合涂层呈现出两种固溶体相并存的微观结构,分别是由高密度碳化物形成的枝晶和在枝晶间隙存在的FCC相的Ni-Co-Fe-Cr-Ti-Mo固溶体组成。这种独特的相组成使得涂层中的高密度碳化物通过位错钉扎和堵塞效应提升了复合涂层的力学性能,显微硬度(HV)提升至947,600℃时的摩擦因数降至0.2。

WC颗粒的引入可触发晶粒细化效应与第二相协同强化机制,从而提高涂层性能。AN X L等^[114]采用激光熔覆技术在钛合金基体表面制备了Fe-Ti-Cr-Co-Mo/WC高熵合金(HEAs)复合涂层。研究表明,WC在熔覆过程中分解并原位生成碳化物,通过第二相强化机制显著提升涂层硬度。同时,WC颗粒作为异质形核基底,促进了熔覆层晶粒细化,最终使复合涂层硬度(HV)较未添加WC的HEAs涂层提高了158。YUE K等^[115]采用激光熔覆法制备了不同WC含量($x=0$ 、10%、20%、30%,质量分数)的HEAs复合涂层,该涂层包含未熔化的WC和原位合成的TiC硬质陶瓷相,其中未熔化的WC颗粒起屏障作用进一步阻碍晶粒生长。原位形成的TiC颗粒在晶粒之间生长,也阻碍了晶粒的进一步扩大。因此,在原位TiC颗粒和未熔化WC颗粒的综合影响下,晶粒得到细化,最终极大地提高了涂层的抗塑性变形能力。与基体涂层相比,其硬度提高了35.8%,磨损率降低了58.2%。

WC颗粒含量也显著影响着HEAs涂层的综合性能。VYAS A等^[116]采用激光熔覆制备了Al-Fe-Cu-Cr-Co-Ni/WC_x复合涂层,发现WC颗粒未改变涂层的FCC/BCC双相及金属碳化物共存结构。熔覆层组织呈现顶部细小等轴晶与底部粗大柱状晶的梯度特征。在置换固溶强化和弥散强化协同作用下,显微硬度随WC含量增加而提升,其中 $x=0.15$ 时硬度较基体提高了79.7%。但当前研究尚未阐明WC对相稳定性的具体作用机制,且缺乏不同基体成分的对比分析(如Al系与Co-Cr-Fe-Ni系差异),这也是后续对WC颗粒含量影响机制研究的重点方向。

2.3.2 SiC陶瓷颗粒增强相

碳化硅(SiC)陶瓷凭借高硬度、高耐磨性、高导热性及抗高温氧化特性,成为提升HEAs涂层性能的理想增强相,可显著提高硬度、耐腐蚀性和抗高温软化能力^[117-119]。研究表明,SiC的引入不仅能促进合金相结构转变,还可通过缺陷抑制机制改善力学性能。冯英豪等^[120]采用激光熔覆制备了Al-Co-Cr-Fe-Ni/SiC_x(质量分数)复合涂层,发现随SiC含量增加,FCC相向BCC相转变,缺陷密度降低,其中SiC_{0.3}涂层硬度(HV)达360,且耐蚀性最优。XU L等^[121]则在Co-Cr-Fe-Ni-Cu体系中观察到了不同现象:尽管涂层保持FCC结构,但SiC颗粒的添加使涂层的孔隙率降低,其中SiC_{0.15}涂层显微硬度(HV)高达568.4。值得注意的是,耐蚀性呈现非线性变化规律,SiC_{0.1}涂层因最低腐蚀电流和最高自腐蚀电位展现出最佳耐蚀性,说明存在SiC的最佳掺杂阈值。但过量SiC颗粒的添加也会造成涂层某些性能的下降,从而对原材料不利,需要根据实际需求把控好SiC颗粒的最佳添加量。

2.3.3 NbC陶瓷颗粒增强相

NbC具有高熔点(约为3 500℃)、高硬度和良好的弹性,是一种常见的陶瓷增强相^[122-123]。NbC颗粒的添加可以显著改变HEAs涂层的晶粒结构,促使等轴晶粒的形成,同时由于其固溶强化和对位错的钉扎能力,可以显著地细化晶粒并使涂层组织更加致密均匀。ZHANG Y等^[124]在TC4合金上制备Fe-Ni-Co-Cr-Ti_{0.5}/NbC HEAs涂层,发现NbC硬质陶瓷颗粒的添加使碳化物类型从TiC主导转变为NbC主导。其中,Nb原子置换BCC晶格中的Ti原子引发了晶格膨胀,结合原子半径较小的C原子带来的间隙固溶强化作用,新形成的复合涂层显微硬度达到了基体的两倍。但过量NbC的添加导致涂层产生局部脆性,微裂纹密度增加了43%,这与热膨胀失配引发的拉伸应力相关。LI X F等^[125]在Al-Co-Cr-Fe-Ni体系中证实,NbC通过钉扎效应使晶粒尺寸从15 μm细化至3.2 μm,NbC质量分数为20%时,硬度(HV)最高为525,对应最优的强韧性平衡,此时涂层的摩擦因数降低至37%。但该体系最佳含量低于钛基体系,反映出Al基体与NbC的界面结合能差异。这表明,①NbC通过置换-间隙协同强化来提升涂层的力学性能。②碳化物含量存在临界阈值,超过后将引发涂层与基体的结合界面失效。③最佳添加量与基体-增强相的热/力学相容性密切相关。后续研究需结合第一性原理计算精确预测不同体系的临界阈值。

NbC陶瓷相不仅具备高硬度和高导热性等陶瓷相的共性,还具备晶粒取向分布调控的独特属性,该相为

双相陶瓷协同强化机制研究提供了理想的模型系统。HAN J T 等^[126]通过激光熔覆法制备了 TiN 和 NbC 颗粒协同增强的 Fe-Co-Ni-Cr-Al HEAs 复合涂层。结果表明,陶瓷颗粒掺入诱导 HEAs 涂层形成双 BCC 固溶体相结构。其中,TiN 对晶粒细化具有显著促进作用,但其细化晶粒呈非均匀分布,而 NbC 可通过抑制局部晶界迁移实现分布均匀化。二者的协同作用最终获得均匀细化的晶粒组织,使涂层抗拉强度与抗塑性变形能力同步提升,显著优化了高合金体系的综合力学性能。使涂层的硬度达到了基体的 1.55 倍,磨损率较基体降低了 88.38%。

2.3.4 TiN 陶瓷颗粒增强相

TiN 陶瓷相因其优异特性[硬度(HV) $\geq 2\,000$,摩擦因数 <0.25]成为 HEAs 涂层的重要强化相,其本身的自润滑效应可降低 30%-45% 的摩擦能耗^[127-129]。研究证实,TiN 主要通过第二相强化机制提升涂层性能。GUO Y X 等^[130]在 TC4 合金表面制备的 Co-Cr-Fe-Ni-Ti_x HEAs 涂层中,当 $x=1$ 时(TiN 体积分数为 12.7%),FCC 基体内弥散分布的 TiN 相使显微硬度(HV)达到了 1 250,较基体提升了 205%,磨损率下降至 $0.23 \times 10^6 \text{ mm}^3/(\text{m} \cdot \text{N})$,仅为基体的 34%。过量 TiN ($x \geq 1.5$)会引发相偏析和 Laves 相析出,导致硬度波动系数达 0.32,磨损表面出现深度 $>50 \mu\text{m}$ 的网状裂纹,断裂韧性降至基体的 50%。胡记等^[131]在 Ti_{0.5}-Co-Cr-Fe-Ni-Al/TiN 体系中揭示,TiN 添加量增至 0.8% 时,

BCC 基体内部形成纳米级 TiN 沉淀相,通过 Orowan 强化使硬度(HV)达到了 980,较基体提升到了 123%,且因晶粒细化保持了 8.5% 的伸长率。值得注意的是,TiN 的强化效果存在临界阈值:当界面错配度 $>6\%$ 时,增强相与基体界面结合处萌生微裂纹的概率将提升 5~7 倍。因此,优化策略应聚焦于:①通过梯度能场调控抑制 TiN 粗化,可以保持粒径 $<2 \mu\text{m}$ 。②采用原位氮化反应改善界面结合,使得界面结合强度 $\geq 350 \text{ MPa}$ 。③复合添加稀土元素净化晶界,来降低 Laves 相有害析出。

TiN 陶瓷颗粒增强 HEAs 涂层多以原位生成为主,其中最常见添加途径是利用激光熔覆的高温环境使 Si₃N₄ 颗粒分解并与 Ti 元素结合生成 TiN 和 (Nb,Ti)₅Si₃ 增强相,其生成机理见图 5。新生成的 TiN 与 (Nb,Ti)₅Si₃ 增强相会显著提升原 HEAs 涂层的硬度与耐磨性。HAO X H 等^[132]采用 LS 技术在钛合金表面制备了原位 TiN-Mo-Nb-Ta-W-Ti RHEAs 复合涂层。分析表明,复合涂层主要分为两层,即顶部的 BCC 相和原位生成的枝晶 TiN 相,以及涂层底部的 BCC 相和弥散分布的晶间 TiN 相。当 Si₃N₄ 含量为 2.0% 时,涂层顶部表面的平均显微硬度(HV)达到 808.67,是基体的 2.33 倍;同时摩擦因数降至 0.300 9,仅为钛合金基体的 59.01%。这表明原位生成的 TiN 增强相通过 Ti 元素与 Si₃N₄ 的反应,显著提高了涂层的硬度和耐磨性。而涂层力学性能的提高归因于 TiN 硬质陶瓷增强相和 Si 元素在 BCC 相中起到固溶强化的效果。

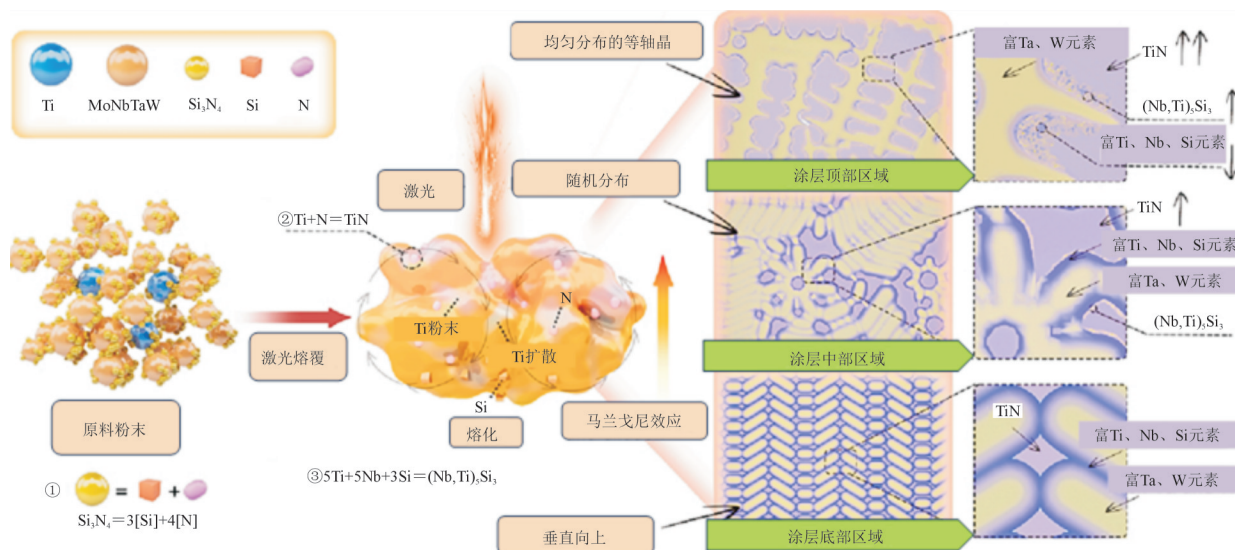


图 5 TiN 与 (Nb,Ti)₅Si₃ 陶瓷增强相形成机理图^[132]

Fig.5 Formation mechanism diagram of TiN and (Nb,Ti)₅Si₃ ceramic reinforcements^[132]

2.3.5 其他颗粒增强相

氧化物陶瓷材料多具有熔点高、化学稳定性强和电绝缘性能良好的特点,在半导体器件和耐高温元件

的制造中广泛应用^[133-134]。但由于其导电性差且与钛合金基体之间的结合度低,导致对钛基氧化物陶瓷增强 HEAs 复合涂层的研究相对较少。氧化物陶瓷增强相形成的天然致密的氧化层薄膜是解决 HEAs 涂层高温

抗氧化性能不佳问题的潜在的选择,其中最有代表性的为 Al_2O_3 。LIU Y X等^[135]采用激光熔覆法在TC4合金基体上制备了 Al-Cr-Fe-Ti-V-B_x ($x=0, 0.5\%$ 和 1% , 摩尔分数) HEAs涂层。结果表明,涂层主要由BCC固溶相、 TiO_2 和 Al_2O_3 陶瓷相组成,在高温氧化过程中,弥散分布的 Al_2O_3 陶瓷颗粒加速了Al元素向涂层外部扩散的速度,导致 Al_2O_3 氧化层的快速形成。随着氧化的继续,连续且致密的 Al_2O_3 氧化层的形成降低了涂层的氧化速率,从而提高了HEAs涂层的高温抗氧化性能。

硼化物陶瓷具有与氧化物不同的高导电性和优异的高热稳定性,可用于制造火箭结构元件、高温材料试验机构件和核装置中的耐热构件。其中TiB可显著提高涂层的耐磨性和硬度,并且TiB的热膨胀系数与钛合金接近,而其本身也具有较高的抗拉强度,因此被认为是在钛合金表面制备陶瓷增强HEAs复合涂层的优选陶瓷材料^[136-137]。HE R等^[138]采用激光熔覆技术在TC4基材表面成功制备了 $\text{Fe-Ni-Cr-Ti}_{0.3}\text{-Al}_{0.3}$ HEAs复合涂层。结果表明,原位反应生成了 $\text{TiC}+\text{TiB}$ 双陶瓷增强相结构,其中TiB增强相呈现细针状,可以从细晶粒强化和位错强化方面有效提高HEAs复合涂层的强度,HEAs复合涂层的最大平均显微硬度(HV)达到875.2,是基体的2.36倍,这表明原位生成的硬质相有效地提高了抗塑性变形能力。

稀土元素具备优异的细晶强化效应,可显著提升高熵合金(HEAs)的强度-韧性协同性^[139-141]。研究表明,稀土掺杂通过抑制晶粒生长和优化相分布,可同步增强HEAs的力学性能与高温稳定性。ZHANG L J等^[142]在 Co-Cr-Cu-Fe-Ni HEAs中添加Gd元素后,晶粒尺寸由 $54\text{ }\mu\text{m}$ 细化至 $12\text{ }\mu\text{m}$,抗压屈服强度提升254%,这归因于晶界强化与位错钉扎效应。XU Q等^[143]构建的 $\text{La}_x\text{-Nb-Mo-Ti-V-Si}_{0.2}$ HEAs体系显示,当La含量增至3.5%时,晶粒尺寸从 $180\text{ }\mu\text{m}$ 细化至 $20\text{ }\mu\text{m}$,抗拉强度达 $2\text{ }157\text{ MPa}$ (提升82%),同时保持15.28%断裂应变,这证实了稀土元素可突破传统材料的强度-塑性倒置关系。当前研究多聚焦于细晶强化单一途径,而稀土还可通过电子结构调控提升耐蚀性,但该机制尚未充分挖掘。后续研究可拓展至多尺度协同强化机制:①构建核壳结构缓解界面应力集中。②设计层状梯度组织平衡强韧性。③开发稀土氧化物弥散强化相。综上,稀土元素与高熵合金涂层的结合有着光明的应用前景,通过跨尺度结构设计与多机制耦合,有望突破现有HEAs性能瓶颈。

3 未来展望

近年来,钛基表面改性陶瓷增强高熵合金(HEAs)

复合涂层的研究取得了显著进展,尤其在涂层的探索、制备及组织性能表征方面成果丰硕。同时,针对HEAs复合涂层制备工艺的相关参数优化与工艺优缺点的系统性研究也在不断深入。然而,现有研究仍存在若干瓶颈问题,如涂层与基体的界面结合强度不足、复杂工艺导致的成本偏高,以及高温/腐蚀性服役环境下的性能衰减问题,这严重制约了HEAs复合涂层在航空航天、海洋工程等领域的规模化应用。基于上述研究进展与现存问题,进一步提出未来可能的研究趋势,旨在通过多尺度结构设计、工艺-性能协同优化等策略突破当前技术瓶颈。

(1)与高熵合金中随意调和的鸡尾酒式金属元素相比,钛基HEAs复合涂层中添加的陶瓷颗粒多以碳化物为主,忽视了对其他性质特殊且性能优异的新型陶瓷颗粒(如氮化物、氧化物、硼化物等)的探索和研究。后续研究工作应尝试添加更广泛的陶瓷颗粒,以赋予复合涂层更加优异的力学及其他特殊性能。

(2)目前对添加陶瓷颗粒的钛基HEAs复合涂层的研究主要集中在单一陶瓷相对基材涂层的影响,对多陶瓷相协同增强涂层性能的强化机制的研究相对较少,未来应加强对多陶瓷相协同强化机制的探究,开拓复合涂层的应用前景。

(3)关于钛基陶瓷增强HEAs复合涂层性能的研究多以室温环境下的常规、摩擦磨损和电化学腐蚀性能为主,对空气稀薄、强酸强碱及核磁辐射等极端条件下的研究较少。将来应对其在苛刻服役环境中的性能研究加以重视,以期能够应用于一些关键零部件的表面保护,如航空航天涡轮叶片、生物医学骨架、超导材料等。

参 考 文 献

- [1] GUO A X Y, CHENG L J, ZHAN S, et al. Biomedical applications of the powder-based 3D printed titanium alloys: A review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 125: 252-264.
- [2] SRIVASTAVA M, JAYAKUMAR V, UDAYAN Y, et al. Additive manufacturing of Titanium alloy for aerospace applications: Insights into the process, microstructure, and mechanical properties[J]. *Applied Materials Today*, 2024, 41: 102 481.
- [3] 范竟一, 马迅, 李伟, 等. 医用钛合金表面改性技术研究进展[J]. *功能材料*, 2022, 53(7): 7 027-7 039.
- [4] 孙正, 王勇, 叶勇, 等. 钛合金表面激光熔覆高熵合金涂层研究进展[J]. *功能材料*, 2023, 54(11): 11 038-11 049.
- [5] JAHANGIRI H, MOHAGHEGHI S, ALAMDARI A A, et al. Microstructure development and mechanical performance of $\text{Al}_2\text{CrFeMnTi}$ light-weight high entropy alloy[J]. *Intermetallics*, 2021, 139: 107 376.
- [6] WANG L L, LI L Q, SUN L X, et al. AlNbTiVZr refractory high entropy alloy combining exceptional high-temperature performance

- and excellent ductility fabricated by laser direct energy deposition [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 999: 174 878.
- [7] NAIZABEKOV A, SAMODUROVA M, BODROV E, et al. 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: e02 541.
- [8] WANG Y Q, WANG R J, LIN J, et al. Mechanical and high-temperature wear resistance properties of WC-reinforced AlCoCrFeNiTi_{0.5} high entropy alloy matrix composite[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(1): 2 162-2 176.
- [9] GUO Y J, LIANG W Q, ZENG M, et al. In-situ TiC reinforced CoCrCuFeNiSi_{0.2} high-entropy alloy coatings designed for enhanced wear performance by laser cladding [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 242: 122 522.
- [10] 索井港, 张聪敏, 刘晨, 等. 激光改性制备钛合金表面 WC 耐磨涂层研究进展[J]. *现代涂料与涂装*, 2025, 28(1): 17-20.
- [11] YU H Y, LIANG W, MIAO Q, et al. High-temperature oxidation resistance and wear properties of functionally graded CrHfNbTaTiN high-entropy nitride coating on Ti alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2025, 680: 161 474.
- [12] YUAN Z W, WANG K, LI S R, et al. Effect of sintering temperature on the properties of titanium matrix composites reinforced with Al_{0.5}CoCrFeNi high-entropy alloy particles[J]. *Materials Science & Engineering*, 2024, 911: 146 920.
- [13] MALAYA K D, ANSHUMAN P, SANTOSH K S, et al. TiC-NiCoCrFeTi high entropy alloy (HEAs) composite coating fabricated by TIG arc scanning for improved tribological performance[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2025, 496: 131 699.
- [14] 代其杨, 许雨翔, 代伟, 等. N 含量对多组元 ZrNbMoTaW 薄膜结构和力学性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2025, 38(2): 80-89.
- [15] LIU Z Y, ZHOU K, ZHU J H, et al. Fabricating ultra wear-resistant surfaces on titanium alloy by combining laser-induced modification with abrasive belt grinding [J]. *Tribology International*, 2024, 200: 110 160.
- [16] SI C R, LI S F, ZHAO L Y, et al. Effect of HVOF-sprayed nano-structured WC-10Co-4Cr coating on sliding wear and tensile-tensile fatigue properties of TC6 titanium alloy[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, 118: 106 463.
- [17] HUA Y H, GUO B S, JIANG L, et al. Controllable multi-scale hydrophobic structures on titanium alloy by polarization-dependent femtosecond laser fabrication and magnetron sputtering[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 2 237-2 248.
- [18] LI H, WANG B G, YANG J S, et al. Corrosion behavior of TC18 titanium alloy with different initial microstructures in salt spray [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 35: 1 619-1 628.
- [19] 王天宇, 孙红飞, 李九霄, 等. 激光表面改性钛合金的摩擦磨损性能研究[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(1): 52-58.
- [20] JU Y, KONOPLIANCHENKO I, PU J F, et al. Optimization of structure and properties of WC-reinforced FeCoNiCr high-entropy alloy composite coating by laser melting[J]. *Results in Engineering*, 2024, 21: 101 985.
- [21] KUMAR S. Comprehensive review on high entropy alloy-based coating[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2024, 477: 130 327.
- [22] CHENG Z, YANG W, XU D P, et al. In situ formation of micro arc oxidation ceramic coating on refractory high entropy alloy [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, 120: 106 563.
- [23] ZHOU X L, HE L J, ZHANG M N, et al. Effect of ceramic particles on microstructure and properties of CoCrMoNbTi high-entropy alloy coating fabricated by laser cladding [J]. *Optik*, 2023, 285: 170 987.
- [24] GUO J, LIU C H, WANG D X. Structure and wear resistance of TiC-reinforced Al_{1.8}CrCuFeNi₂ high-entropy alloy coating using laser cladding[J]. *Materials*, 2023, 16(9): 3 422.
- [25] XIONG J K, WANG D, CAI Y, et al. Effect of high-temperature heat treatment on microstructure and properties of FeMnCrNiCo+20%TiC high-entropy alloy coating[J]. *Applied Physics*, 2022, 128(4): 1-11.
- [26] LU J, LI L, CHEN Y, et al. Y-Hf co-doped AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating with superior oxidation and spallation resistance at 1 100 °C[J]. *Corrosion Science*, 2021, 182: 109 267.
- [27] XIAO M, NAI S F, NAN S, et al. In situ formation of spherical MoS₂ particles on high-entropy alloy coating for low friction [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 302: 127 761.
- [28] DENG J G, YANG J, LU L L, et al. Corrosion behavior of refractory TiNbZrMoV high-entropy alloy coating in static lead-bismuth eutectic alloy: A novel design strategy of LBE corrosion-resistant coating?[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2022, 448: 128 884.
- [29] 耿欢, 顾永鹏, 林国帅. ZrO₂ 对高熵合金 TiZrMoCoCr_{0.2} 性能影响[J]. *科学技术创新*, 2025(6): 13-16.
- [30] MA Q, LU B W, ZHANG Y M, et al. Crack-free 60% WC reinforced FeCoNiCr high-entropy alloy composite coating fabricated by laser cladding[J]. *Materials Letters*, 2022, 324: 132 667.
- [31] WANG Y, LI P J, MA N, et al. Effect of Y₂O₃ on the microstructure and tribology property of WMoTaNb refractory high entropy alloy coating prepared by laser cladding [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, 115: 106 273.
- [32] 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: 162 061.
- [33] LI Z, DONG J W, YANG Y, et al. Synergistic enhancement of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating through Laves phase and ceramic phase collaboration [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2024, 491: 131 192.
- [34] ZHANG B S, YU Y Q, ZHU S S, et al. Microstructure and wear properties of TiN-Al₂O₃-Cr₂B multiphase ceramics in-situ reinforced CoCrFeMnNi high-entropy alloy coating [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 276: 125 352.
- [35] 司衍鑫. Ti-V-Cr-Zr-W(N) 涂层构筑及其微观结构、摩擦学性能研究[D]. 山东烟台: 烟台大学, 2022.
- [36] YI S G, LU W Z, GAO C Z, et al. Composition, structure, and wear resistance of (Ti-Zr-Nb-Mo-Ta)_xN_{1-x} high entropy alloy carbonitride coatings prepared by reactive radio-frequency magnetron sputtering [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2024, 477: 130 333.
- [37] HE H J, LAI M L, LIU C H, et al. Effects of deposition tempera-

- ture on the microstructure, mechanical properties, high temperature corrosion and oxidation properties of AlCrNbTiZr high entropy alloy coatings [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 112: 106-156.
- [38] WANG C J, YANG W, SHAO W T, et al. Effect of sputtering time on the microstructure and properties of MAO/Co-Cr-Fe-Ni composite coatings on TC11 alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 7 663-7 674.
- [39] ZHANG X Y, PELENOVICH V, LIU Y, et al. Effect of bias voltages on microstructure and properties of (TiVCrNbSiTaBY)N high entropy alloy nitride coatings deposited by RF magnetron sputtering [J]. Vacuum, 2022, 195: 110-110.
- [40] ZHANG X Y, ZENG X M, LIU Y, et al. Effects of RF magnetron sputtering power on the structure and nanohardness of high-entropy alloys (TiVCrNbSiTaBY)N hard coatings [J]. Ceramics International, 2023, 49(20): 33 418-33 424.
- [41] DENG W, YANG W, YU S, et al. Preparation and properties of Cu-Containing high-entropy alloy nitride films by magnetron sputtering on titanium alloy [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024, 39(6): 1 586-1 594.
- [42] ZHAO S, LIU C H, YANG J J, et al. Mechanical and high-temperature corrosion properties of AlTiCrNiTa high entropy alloy coating prepared by magnetron sputtering for accident-tolerant fuel cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 417: 127-128.
- [43] LU Y. A lightweight AlTiVNb high-entropy alloy film with high strength-ductility synergy and corrosion resistance [J]. Materials, 2022, 15: 238-238.
- [44] LOU B S, LIN R Z, LIC L, et al. Fabrication of (TiZrNbSiMo)_{1-x}N_x high entropy alloy coatings using a high power impulse magnetron sputtering technique: Effects of nitrogen addition [J]. Surface & Coatings Technology, 2024, 483: 130-130.
- [45] GARAH M E, SOUBANE D, SANCHETTE F. Review on mechanical and functional properties of refractory high-entropy alloy films by magnetron sputtering [J]. Emergent Materials, 2024, 7(1): 77-101.
- [46] MAJJI B G R, VASUDEV H, BANSAL A, et al. A review on the oxidation and wear behavior of the thermally sprayed high-entropy alloys [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50: 1 447-1 451.
- [47] MENGISTE B T, ARAB A, CHEN P W, et al. Effect of cold spray deposition parameters on wear performance of CrMnFeCoNi high entropy alloy [J]. Tribology International, 2025, 204: 110-110.
- [48] 马震, 张士陶, 刘正义, 等. 大气等离子喷涂制备Fe-Co-Ni-Cr系高熵合金涂层的研究现状 [J]. 机械工程材料, 2022, 46(5): 1-8.
- [49] BASAK A K, KURDI A, RADHIKA N, et al. Compressive mechanical properties of thermal sprayed Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloy coating [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 10(3): 175-175.
- [50] ASHOKAN V, GAURAV V, BABU S P K, et al. Microstructure evolution and erosion behaviour of thermally sprayed AlCoCrNiMo_{0.1} high entropy alloy coating [J]. Ceramics International, 2023, 49(19): 32 331-32 336.
- [51] ZHANG X, ZHANG N N, XING B W, et al. Oxidation behavior of AlCoCrFeNiSi_x high entropy alloy bond coating sprepared by atmospheric plasma spray [J]. Surface & Coatings Technology, 2023, 462: 129-129.
- [52] 张志彬, 种凯, 何鹏飞, 等. 热喷涂高熵合金涂层的研究现状与展望 [J]. 中国材料进展, 2025, 44(4): 349-359.
- [53] 于宝义, 马洪迪, 郑黎. 激光辅助冷喷涂制备SiC-316复合涂层的组织与性能 [J]. 金属热处理, 2025, 50(4): 295-301.
- [54] WU D, XU Y, LI W Q. Process optimisation of cold spray additive manufacturing of FeCoNiCrMn high-entropy alloy [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28(7): 540-547.
- [55] XU Y X, LI W Y, QU L Z, et al. Solid-state cold spraying of FeCoCrNiMn high-entropy alloy: An insight into microstructure evolution and oxidation behavior at 700~900 °C [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 68(9): 172-183.
- [56] DU D X, LIU D X, MENG B L, et al. Effects of pretreatment and HVOF sprayed cermet coating on fatigue properties of TC21 titanium alloy [J]. Science China Technological Sciences, 2013(4): 1 029-1 037.
- [57] HE Y Y, YANG K, XU Z Y, et al. Finite element simulation study on cold spray aluminum alloy particle deposition [J]. IOP Publishing Ltd, 2025, 35(2): 279-290.
- [58] KIPLANGAT R S, LIN T T, KIPKIRUI N G, et al. Microstructure and mechanical properties of the plasma-sprayed and cold-sprayed Al_{0.5}CoCrFeNi₂Ti_{0.5} high-entropy alloy coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31: 1 207-1 221.
- [59] CHEN L J, WANG X Z, JI Y T, et al. Elevated-temperature wear behavior and mechanisms of APS-sprayed Al_{0.6}TiCrFeCoNi high entropy alloy coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2024, 477: 130-130.
- [60] YIN S, LI W Y, SONG B, et al. Deposition of FeCoNiCrMn high entropy alloy (HEAs) coating via cold spraying [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(6): 1 003-1 007.
- [61] 李伟, 张玉鼎, 鞠龙华. 激光表面改性技术在轨道交通领域的应用 [J]. 应用激光, 2024, 44(10): 51-60.
- [62] 张宏, 石岩, 徐春鹰, 等. 激光淬火对钛合金TC11微动磨损性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2001, 22(2): 37-40.
- [63] 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.
- [64] WU C L, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Phase evolution and cavitation erosion-corrosion behavior of FeCoCrAlNiTi_x high entropy alloy coatings on 304 stainless steel by laser surface alloying [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 698: 761-770.
- [65] GUO F L, GAO W B, CHEN C R, et al. Review on hard particle reinforced laser cladding high-entropy alloy coatings [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 1 366-1 405.
- [66] 舒宗富, 黄春平, 张耀祖, 等. 激光熔覆Ti60合金的工艺参数优化及组织性能研究 [J]. 中国激光, 2024, 51(12): 94-104.
- [67] ZENG Y D, GUO Y Q, YANG Q L, et al. Effect of Ti, Mn and Mo on the microstructure and properties of Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloy coatings prepared by laser cladding [J]. Materials Today Communications, 2024, 41: 110-110.
- [68] ZHANG H, PAN Y, HE Y Z, et al. Microstructure and properties of 6FeNiCoSiCrAlTi high-entropy alloy coating prepared by laser cladding [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(6): 2 259-2 263.

- [69] MENG Y C, YANG Z, SHI Y L, et al. Microstructural evolution and enhanced properties of multi-layer TiZrNbCrCo high entropy alloy coatings laser-clad onto Ti-6Al-4V alloy [J]. *Intermetallics*, 2024, 173: 108 407.
- [70] ZHANG Z K, HUA K, CAO Y, et al. Microstructures and properties of FeCrAlMoSi_x high entropy alloy coatings prepared by laser cladding on a titanium alloy substrate [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 478: 130 437.
- [71] ZHANG Z, LI J N, ZHANG S Z, et al. Laser surface modification of a laser clad ceramics reinforced multiphase coating on TA2 titanium alloy[J]. *Lasers in Engineering*, 2021, 51: 1-5.
- [72] ELSHAZLI A, ELSHARE R, HUSSEIN A H, et al. Laser Surface Modification of TC21 (α/β) Titanium Alloy Using a Direct Energy Deposition (DED) Process [J]. *Micromachines*, 2021, 263: 265 897.
- [73] SOARE V, BURADA M, CONSTANTIN I, et al. Electrochemical deposition and microstructural characterization of AlCrFeMnNi and AlCrCuFeMnNi high entropy alloy thin films[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 358: 533-539.
- [74] YOOSEFAN F, ASHRAFI A, MONIRVAGHEFI S M. Characterization of Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloy thin films synthesized by pulse electrodeposition: Part 2: Effect of pulse electrodeposition parameters on the wettability and corrosion resistance[J]. *Metals and Materials International*, 2021, 27(1): 106-117.
- [75] AWAYSSA O, SAEVARSDOTTIR G, MEIRBEKOVA R, et al. Electrodeposition of aluminium-titanium alloys from molten fluoride-oxide electrolytes [J]. *Electrochemistry Communications*, 2021, 123: 106 919.
- [76] BELLO Z A, KANG M, NDUMIA J N, et al. Microstructure and wear behavior of WC-reinforced AlCoCrFeNiSi high entropy alloy coatings prepared by high-velocity arc spraying[J]. *Surface&Coatings Technology*, 2024, 494(2): 131 421.
- [77] HUANG J, SHEN L, YU S R, et al. Corrosion characterization of in situ nitrogen reinforced titanium alloy arc cladding layer[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33: 10 546-10 559.
- [78] LONGA Y, SHINYA M, TAKEMOTO M. Coatings of aluminate intermetallic compounds on steel utilizing a hybrid technique of spraying and IR-laser fusion[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1994, 9(3): 493-505.
- [79] ANG A S M, BERNDT C C, SESSO M L, et al. Plasma-sprayed high entropy alloys: Microstructure and properties of AlCoCrFeNi and MnCoCrFeNi [J]. *Metallurgical & Materials Transactions*, 2015, A46(2): 791-800.
- [80] RUI F, MICHAEL G, CHAOHO L, et al. Design of light-weight high-entropy alloys[J]. *Entropy*, 2016, 18(9):333-354.
- [81] ZHANG X R, CUI X F, QI M, et al. Corrosion and passivation behavior of in-situ TiC reinforced Al_{0.1}CrNbSi_{0.1}TaTiV refractory high entropy alloy coatings via doping C [J]. *Corrosion Science*, 2024, 227: 111 736.
- [82] ZHU T, WU H, ZHOU R, et al. Microstructures and tribological properties of TiC reinforced FeCoNiCuAl high-entropy alloy at normal and elevated temperature[J]. *Metals*, 2020, 10(3): 387-401.
- [83] XU S Y, HONG L, WU S Y, et al. Effect of transition-metals (Fe, Co and Ni) on the L12-phase strengthening in the Al_{0.3}CrFeCoNi high-entropy alloy[J]. *Intermetallics*, 2024, 166: 108 206.
- [84] REN J, GE Y, LI W, et al. Molecular dynamics investigation of friction properties in FeCoNiTi high-entropy alloy coatings on titanium substrate [J]. *Journal of Materials Science*, 2025, 60(12): 5 442-5 458.
- [85] TOKAREWICZ M, GRDZKA-DAHLKE M. Review of recent research on AlCoCrFeNi high-entropy alloy [J]. *Metals*, 2021, 11(8): 1 302-1 316.
- [86] XIONG Y F, ZHANG F M, HUANG Y N, et al. Multiple strengthening via high-entropy alloy particle addition in titanium matrix composites fabricated by spark plasma sintering[J]. *Materials Science & Engineering*, 2022, A859: 144 235.
- [87] SANG Y P, LI D, DENG W L. Electron beam weldability of TiZrNbTa refractory high-entropy alloy and TC4 titanium alloy [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 107 890.
- [88] LIU L, LIU H X, ZHANG X W, et al. Corrosion behavior of TiMoNbX (X = Ta, Cr, Zr) refractory high entropy alloy coating prepared by laser cladding based on TC4 titanium alloy[J]. *Materials*, 2023, 16(10): 3 860-3 875.
- [89] BAI L H, HU Y L, LIANG X B, et al. Titanium alloying enhancement of mechanical properties of NbTaMoW refractory high-Entropy alloy: First-principles and experiments perspective [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 857: 157 542.
- [90] PENG S, XU J, XIE Z H, et al. Titanium bipolar plates augmented by nanocrystalline TiZrHfMoW coatings for application in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 591: 153 200.
- [91] SHARMA B, NAGANO K, SAXENA K K, et al. Application of hydride process in achieving equimolar TiNbZrHfTa BCC refractory high entropy alloy[J]. *Crystals*, 2020, 10(11): 1 020-1 032.
- [92] CARLUCCI G, FIOCCHI J, MOTTA C, et al. Effect of Al and Nb on microstructure and mechanical properties of novel Al-Mo-Nb-Ti-V-Zr lightweight refractory high-entropy alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1 008: 176 655.
- [93] LÜ X, ZHANG H, LI Z, et al. Tailoring planar slip for synergistic improved strength and plasticity in an Al_{0.75}NbZr_{1.5}Ti₃V lightweight high-entropy alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 994: 174 689.
- [94] ASL K M, MASOUDI A, KHOMAMIZADEH F. The effect of different rare earth elements content on microstructure, mechanical and wear behavior of Mg-Al-Zn alloy[J]. *Materials Science & Engineering*, 2010, A527(7-8): 2 027-2 035.
- [95] KAMAL M V, RAGUNATH S, SAGAR REDDY M H, et al. Recent advancements in lightweight high entropy alloys - A comprehensive review[J]. *International Journal of Lightweight Materials & Manufacture*, 2024, 7(5): 699-720.
- [96] WANG W Q, QU L D, LU Y Z. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of lightweight high-entropy alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1 008: 176 219.
- [97] KARABACAK A H, ANAK A, ZKAYA S, et al. Effect of AlCr-CuFeNi high entropy alloy reinforcements with and without B₄C on powder characteristic, mechanical and wear properties of AA5083 metal-metal composites [J]. *Journal of Alloys and Compounds*,

- 2024, 1 008: 176 627.
- [98] ZHANG M N, ZHOU X L, LI J H. Microstructure and mechanical properties of a refractory CoCrMoNbTi high-entropy alloy[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2017, 26(8): 1-9.
- [99] DANILO C M, VINICIUS R M G, TORRENTO J E M, et al. In-situ production of a biomedical metal-matrix composite based on a high entropy alloy reinforced with TiC and TiB[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 4 009-4 019.
- [100] TU Y C, LI J J, YUAN Y Y, et al. Thickness modulation influenced mechanical properties of TiN/(CrVTaTiW) N_x multilayer coatings[J]. Ceramics International, 2024, A50(24): 53 007-53 014.
- [101] RUSINOV P O, BLEDNOVA Z M. Study of the structure and properties of a high-entropy ceramic composite material[J]. Surface Innovations, 2022, 10(3): 217-226.
- [102] SUN D, CAI Y C, ZHU L S, et al. High-temperature oxidation and wear properties of TiC-reinforced CrMnFeCoNi high entropy alloy composite coatings produced by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2022, 438: 128 407.
- [103] XU L F, LIM X, SONG Z H, et al. WC-high entropy alloy reinforced long life self-grinding silage knife prepared by laser cladding[J]. Nanomaterials, 2022, 12(6): 1 013-1 026.
- [104] HAO X H, LIU H X, ZHANG X W, et al. Microstructure of in-situ and wear resistance TiN/(Nb, Ti)₃Si₅ MoNbTaWTi based reinforced refractory high entropy alloy composite coatings by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2023, 626: 157 240.
- [105] PENG Y B, ZHANG W, LI T C, et al. 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: 105 044.
- [106] 蒋廷普, 孙荣禄, 牛伟, 等. SiC添加量对CoCrFeNi高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(6): 198-205.
- [107] WANG Y, MA B Y, LI W, et al. Microstructures physical and corrosion behavior of NiCoFeCu high-entropy alloy nanocomposite coatings electro-co-deposited with nano-Si₃N₄ particles[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024(33): 2 731-2 743.
- [108] 彭德林, 赵璐华, 杜立明. 陶瓷颗粒增强钛基复合材料的研究进展[J]. 钛工业进展, 2010, 27(2): 1-8.
- [109] 张晓宇, 李纪龙, 慈世伟, 等. 激光熔覆陶瓷颗粒增强金属复合材料研究进展[J]. 热喷涂技术, 2024, 16(1): 18-34.
- [110] LIU S S, ZHANG M, ZHAO G L, et al. Microstructure and properties of ceramic particle reinforced Fe-Co-Ni-Cr-Mn-Ti high entropy alloy laser cladding coating[J]. Intermetallics, 2022, 140: 107 402.
- [111] RICO-CANO A D, MIRZA-ROSCA J C, OCAK B C, et al. Corrosion behavior of new B₄C ceramic doped with high-entropy alloy in an aggressive environment[J]. Microscopy and Microanalysis, 2024, 81: 169 802.
- [112] JIANG J, SUN T, HUANG G Q, et al. Microstructure evolution and tribological behavior of laser clad Al_{1.8}CrCuFeNi₂/WC composite coatings on Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 114: 106 254.
- [113] ZHANG H, LIU G, REN N N, et al. Microstructure evolution and high temperature wear resistance of in-situ synthesized carbides reinforced Ni-Co-Fe-Cr-Si-Mo high entropy alloy coatings fabricated by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 464: 129 573.
- [114] AN X L, LIU Q B, ZHENG B. Effect of wolfram carbide particles on high entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(12): 129 001.
- [115] YUE K, WANG L, XU Z, et al. Effect of WC content on the microstructure and wear resistance of laser cladding AlCoCrFeNiTi_{0.5} high-entropy alloy coatings[J]. Ceramics International, 2024(50): 41 515-41 526.
- [116] VYAS A, MENGHANI J, NATU H. Influence of WC particle on the metallurgical, mechanical, and corrosion behavior of AlFeCuCrCoNi/WC high-entropy alloy coatings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(4): 2 449-2 461.
- [117] ZHANG S L, SUN Y N, CHENG W J, et al. Microstructure and tribological behavior of CoCrFeNiMo_{0.2}/SiC high-entropy alloy gradient composite coating prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 467: 129 681.
- [118] XU Y K, WANG G, SONG Q, et al. Microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of SiC reinforced Al_xCoCrFeNiTi_{1-x} high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 437: 128 349.
- [119] ZHANG Y S, LIU Z G, LÜ Z H, et al. Effect of SiC and TiC content on microstructure and wear behavior of Ni based composite coating manufactured by laser cladding on Ti-6Al-4V[J]. Wear, 2024, 552-553: 205 431.
- [120] 冯英豪, 李晓峰, 刘斌, 等. SiC颗粒对AlCoCrFeNi高熵合金涂层显微组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 160-163.
- [121] XU L, DU H L, LI U J, et al. Microstructure, mechanical, and electrochemical properties of SiC particle reinforced CoCrFeNiCu high-entropy alloy coatings[J]. Coatings, 2022, 12(4): 519-529.
- [122] WU H, ZHANG S, ZHANG H Y, et al. Exploration of wear and slurry erosion mechanisms of laser clad CoCrFeNi+X(NbC) high entropy alloys composite coatings[J]. Tribology International, 2024, 193: 109 405.
- [123] CAO Y B, ZHI S X, QI H B, et al. Evolution behavior of ex-situ NbC and properties of Fe-based laser clad coating[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 124: 105 999.
- [124] ZHANG Y, XIAO M, ZHOU Y M, et al. Microstructural transformation and tribological properties of laser clad FeNiCoCrTi/NbC high entropy alloy-based composite coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(4): 1 232-1 243.
- [125] LI X F, FENG Y H, LIU B, et al. Influence of Nb O particles on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 485-494.
- [126] HAN J T, TANG S D, GUAN J H, et al. Microstructure and wear property of (TiN+NbC) double ceramic phase-reinforced in FeCrNiCoAl high-entropy alloy coating fabricated by laser cladding[J]. Ceramics International, 2024, 50: 49 066-49 084.
- [127] LIANG G, JIN G, CUI X F, et al. The directional array TiN-reinforced AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy synthesized in situ via

- magnetic field-assisted laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2022, 572: 151 407.
- [128] JIANG J X, PANG X M, ZHOU J X, et al. Optical performance and corrosion resistance of TiN/Ni multiphase cermet by laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107 308.
- [129] WANG J Y, CUI X F, ZHAO Y, et al. Microstructure and performance enhancement of the TiN/Fe-based cladding layer induced by mechanical vibration assisted underwater wet laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2024, 476: 130 176.
- [130] GUO Y X, SHANG X J, LIU Q B. Microstructure and properties of in-situ TiN reinforced laser cladding CoCrFeNiTi high-entropy alloy composite coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 344: 353-358.
- [131] 胡记, 隋欣梦, 张林, 等. TiN 含量对 $\text{Ti}_{0.8}\text{CoCrFeNiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. 航空制造技术, 2021, 64(19): 71-79.
- [132] HAO X H, LIU H X, ZHANG X W, et al. Effect of Si_3N_4 content on microstructure and frictional-wear properties of MoNbTaWTi refractory high entropy alloy composite coatings [J]. Materials Today Communications, 2024, 40: 109 416.
- [133] SHI C Y, WANG J H, LIU Y, et al. Effects of different valence of starting oxides on the structure and properties of CoMnFeZnNiO high-entropy ceramics [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1 005: 176 126.
- [134] ZHANG G, HUANG S, LI X S, et al. Oxide ceramic coatings with amorphous/nano-crystalline dual-structures prepared by micro-arc oxidation on TiNbZr medium entropy alloy surfaces for biomedical applications [J]. Ceramics International, 2023, 49: 18 114-18 124.
- [135] LIU Y X, LIU H X, YANG C, et al. Microstructure and high-temperature oxidation resistance of in-situ Al_2O_3 reinforced AlCrFeTiV high-entropy alloy with boron microalloying [J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 108 645.
- [136] GENG J Y, YANG X H, WANG G C, et al. Effect of TiB_2 content on the microstructure, corrosion behavior, and wear resistance of $(\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{30}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10})_{0.8}\text{-X}(\text{TiB}_2)_x\text{Mo}_{0.2}$ high-entropy alloy coatings by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2025, 505: 132 096.
- [137] DONG Y H, CAI Z B, LING P, et al. Microstructure and tribological performance of ultra-high-speed laser-cladded AlCrCoFeNi $_{2.1-x}$ TiB $_2$ ($x=0, 0.5, 1.0, 1.5$ and $2.0, \%$) high-entropy alloy coatings[J]. Materials Today Communications, 2023, 36: 106 834.
- [138] HE R, WU M P, CUI C, et al. Laser cladding manufacturing of TiC+TiB $_x$ reinforced FeNiCrTi $_{0.3}$ Al $_{0.3}$ high entropy alloy composite coating: Effects on corrosion and tribology[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 970: 172 631.
- [139] STANFORD N, BARNETT M R. The effect of rare earth elements on the behaviour of magnesium-based alloys: Part 2-Recrystallisation and texture development[J]. Materials Science and Technology, 2013, 565: 469-475.
- [140] GUO K T, SUN Y N, CHENG W J. Effect of rare earth La_2O_3 on themicrostructure and tribological properties of laser-clad CoCrFeNi-MoSi high-entropy alloy coatings [J]. Materials Letters, 2024, 355: 135 398.
- [141] LI S D, LIU D F, LIU G, et al. Study on the preparation of CeO_2 doped AlCoCrFeNiTi high entropy alloy bioinertcoatings by laser cladding: The effect of CeO_2 particle size on the tribological properties of the coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 475: 130 155.
- [142] ZHANG L J, YU P F, ZHANG M D, et al. Microstructure and mechanical behaviors of Gd $_2$ CoCrCuFeNi high-entropy alloys [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2017, 707: 708-716.
- [143] XU Q, CHEN D Z, WANG C R, et al. Effects of La on microstructure and mechanical properties of Nb-Mo-Ti-V-Si $_{0.2}$ refractory high entropy alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31: 512-520.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和技術信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 11 楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

