

DOI: 10.19947/j.issn.1001-7208.2024.11.03

## 采用激光熔覆技术制备合金涂层的研究现状与发展趋势

张森<sup>1</sup> 王俊杰<sup>1</sup> 张国良<sup>2</sup> 范鸿志<sup>1</sup>

(1. 泰山科学技术研究院(泰安市创新发展研究院), 山东 泰安 271000; 2. 山东省科技服务发展推进中心, 山东 济南 250101)

**【摘要】** 简述了激光熔覆技术的原理和特点, 自熔性合金、高熵合金、非晶合金涂层的特点和显微组织。展望了采用激光熔覆技术制备合金涂层的主要研究方向。

**【关键词】** 激光熔覆, 合金涂层, 工艺参数, 显微组织

中图分类号: TG665

文章编号: 1001-7208(2025)05-0001-06

## Research Status and Development Trend of Alloy Coatings Prepared by Laser Cladding Technology

ZHANG Sen<sup>1</sup> WANG Junjie<sup>1</sup> ZHANG Guoliang<sup>2</sup> FAN Hongzhi<sup>1</sup>

(1. Taishan Institute of Science and Technology (Tai'an Innovation and Development Institute), Tai'an Shandong 271000, China; 2. Promotion Center for Scientific and Technical Service Development of Shandong Province, Jinan Shandong 250101, China)

**【Abstract】** Following contents, among which were: the principle and characteristics of laser cladding technology, the features and microstructure of self-melting alloy, high-entropy alloy and amorphous alloy coating, were described briefly. The main research directions in fabricating the alloy coating by laser cladding technology were forecasted.

**【Key Words】** laser cladding, alloy coating, process parameter, microstructure

修复再制造是在损伤或失效的零部件表面形成结合力大、耐磨耐蚀的新工作层,以延长其使用寿命<sup>[1-2]</sup>。在工业应用中,轧辊、电机转子轴、燃气轮机叶片等零部件长期处于高温、高压环境中,易因磨损等而失效,采用表面处理技术进行修复再制造已成为研究热点。

激光熔覆技术是一种再制造技术,其特点是<sup>[3-5]</sup>:热量集中、冷却速度快、稀释率极低、对基体的损伤很小、熔覆层晶粒细小、性能良好、不易产生缺陷,工艺参数可精确控制、能精确修复零件特定部位,可操作性好、效率高、基本无污染等。按照技术原理的不同,激光熔覆技术一般可分为预置粉末、同轴送粉、离轴送粉3种类型。预置粉

末激光熔覆技术具有工艺简单、操作方便的特点,但粉末损失较大;同轴送粉激光熔覆技术具有送粉方向与光束方向一致、粉末利用率高的特点;离轴送粉激光熔覆技术具有方便、不浪费材料的特点,但扫描方向发生变化将导致涂层不均匀。同轴送粉的效率和制备的涂层质量均较好,是常用的激光熔覆技术。采用激光熔覆技术制备合金涂层能提高材料的硬度、耐磨性等<sup>[6]</sup>,实现对失效零部件的修复再制造,被广泛用于修复精度高、附加值高、性能要求高的零部件。目前国内外研究者采用激光熔覆技术在零部件表面制备了合金涂层,相关研究成果已被应用于航空航天、汽车制造、石化、冶金、铁路机车等领域<sup>[7]</sup>。本文围绕合

基金项目: 山东省重点研发计划(2023RKY02006)

作者简介: 张森,男,副研究员,主要从事科技管理、材料与再制造研究,E-mail: tskxy2014@163.com

通信作者: 张国良,男,副研究员,主要从事科技管理研究,E-mail: 18764628205@139.com

金涂层的材料体系,综述了激光熔覆制备合金涂层的发展现状。

### 1 自熔性合金涂层

自熔性合金是指基体中加入含有脱氧和自熔作用的硅、硼等元素的合金,具有良好的润湿性和优异的工艺性能<sup>[8]</sup>。自熔性合金涂层按基体成分的不同,分为钴基、镍基和铁基等<sup>[9-11]</sup>,是激光熔覆制备合金涂层比较传统的材料体系。

添加适量稀土元素能改善元素偏析、细化组织、消除或减少钴基合金涂层中的气孔和裂纹。加入铬能形成高耐腐蚀性的固溶体和枝晶间碳化物 $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,有利于提升涂层的硬度和耐腐蚀性<sup>[12]</sup>;加入钼有利于促进合金的非平衡凝固,提高涂层的耐磨耐蚀性<sup>[13-14]</sup>。姚芳萍等<sup>[15]</sup>在H13钢表面激光熔覆

制备了 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 质量分数为0.0.5%、1.5%、2.5%、3.5%的Stellite156钴基合金涂层,发现 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 质量分数为2.5%的涂层质量最佳,涂层物相主要为 $\text{Cr-Ni-Fe-Cr-Ni}_{17}\text{W}_3$ 及少量 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 和 $(\text{Cr,Co,Ni})_{23}\text{C}_6$ ,涂层组织细小,成分偏析明显改善,添加适量的 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 能提高涂层硬度。尹燕等<sup>[16]</sup>采用超高速激光熔覆技术在32Cr3Mo1V铸轧辊套表面制备了钴基合金涂层,涂层组织致密细小,无明显裂纹、气孔等缺陷,有效改善了辊套的耐高温摩擦磨损性能。周丹等<sup>[17]</sup>制备了TiC质量分数为10%、20%、30%和40%的钴基合金涂层,其显微组织如图1所示,研究发现:随着TiC含量的增加,涂层中未熔TiC颗粒增多,从而使涂层中第二相颗粒明显增多;随着TiC含量的增加,涂层硬度及耐磨性提高。

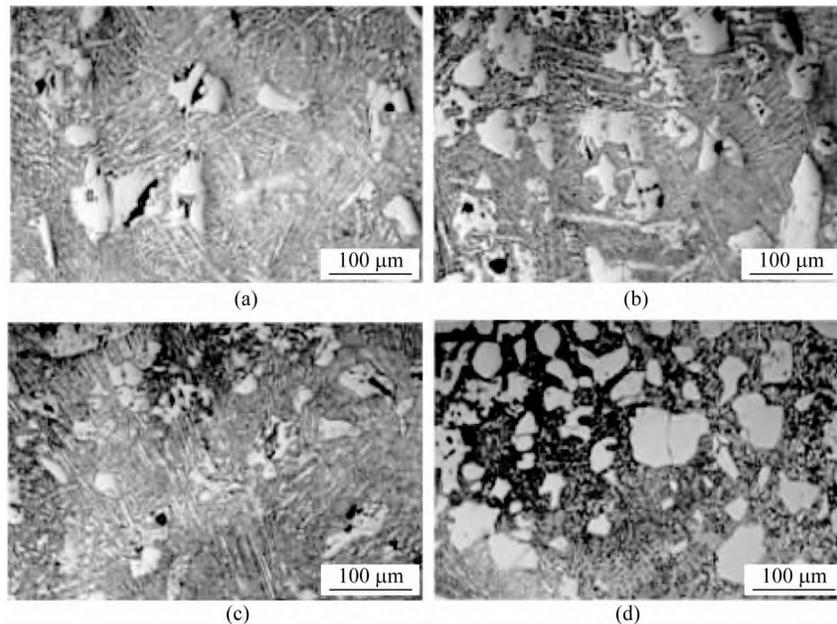


图1 含质量分数10% (a)、20% (b)、30% (c)和40% (d)的TiC钴基合金涂层的显微组织<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Microstructures of the cobalt-base alloy coatings with 10% (a), 20% (b), 30% (c) and 40% (d) by mass TiC<sup>[17]</sup>

铁基合金涂层的耐磨性与显微组织密切相关。Peng等<sup>[18]</sup>在贝氏体钢表面激光熔覆制备了耐磨铁基合金涂层,研究发现,激光扫描速率越大,枝晶间元素分布越不均匀,涂层耐磨性提高。孙允森等<sup>[19]</sup>研究了激光熔覆304不锈钢耐磨涂层的显微组织,结果表明:涂层组织呈枝晶状,涂层底部主要是柱状晶和胞状晶,中部主要是柱状晶,顶部以等轴晶为主;熔覆层组织主要由细小致密的枝晶状奥氏体( $\gamma$ )和长条状 $\text{FeCr}$ ( $\sigma$ )相组

成, $\sigma$ 相从枝晶间的共晶铁素体( $\delta$ )中析出,枝晶间Cr元素的富集能促进 $\sigma$ 相的形成和粗化。激光熔覆304不锈钢涂层不同部位的显微组织如图2所示。

硬质增强相具有细晶强化、弥散强化、固溶强化等作用,加入硬质强化相能使涂层组织均匀致密,提升合金涂层的硬度和耐蚀性。Wang等<sup>[20]</sup>在35CrMo钢表面制备了 $\text{V}_8\text{C}_7$ 增强铁基合金涂层,研究了涂层的相组成和性能,发现原位硬质增

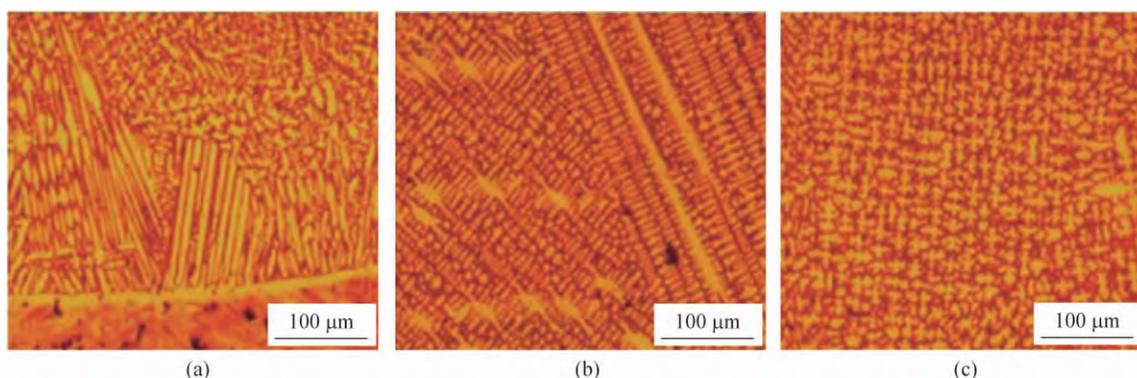


图 2 激光熔覆 304 不锈钢涂层底部(a)、中部(b)和顶部(c)的显微组织<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Microstructures at the bottom(a), middle(b) and top(c) of the 304 stainless steel coating clad by laser<sup>[19]</sup>

强相能显著提高铁基合金涂层的耐磨性。张华健等<sup>[21]</sup>采用激光熔覆技术制备了含 WC 颗粒的铁基合金涂层,涂层组织由柱状晶、树枝晶和共晶组成,致密无缺陷,WC 颗粒显著提高了涂层的耐磨性,但硬度提高不明显。崔静等<sup>[22]</sup>、杨尚武等<sup>[23]</sup>研究表明:镍基合金涂层的硬度与晶粒细化和硬质相等

有关,添加适量的(Ti, W) C 颗粒会显著提高合金涂层的硬度及耐磨性。周志杰等<sup>[24]</sup>采用激光熔覆技术在 20Cr13 钢表面制备了 Ni60A 镍基合金涂层,涂层结合区、中间区和顶部的微观组织依次为平面晶、柱状晶、胞状晶和细小树枝晶,如图 3 所示,涂层平均硬度约为基体的 2.68 倍。

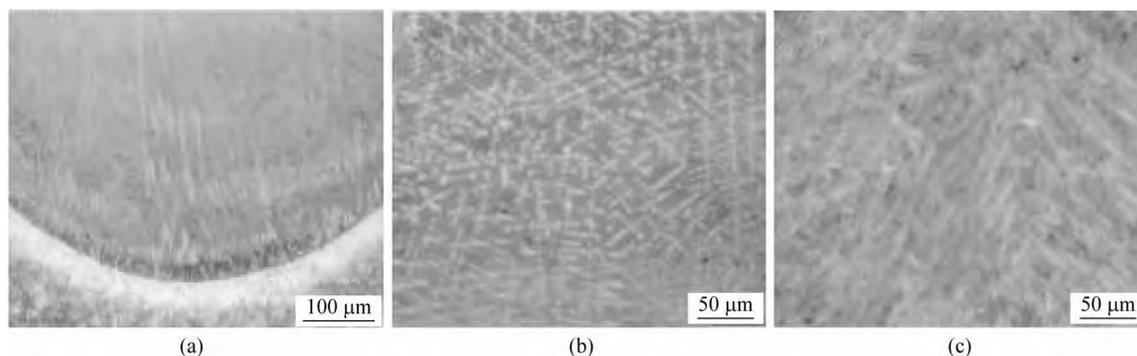


图 3 激光熔覆镍基合金涂层的结合区(a)、中间区(b)和顶部(c)微观组织<sup>[24]</sup>

Fig. 3 Microstructures in the binding area(a), intermediate area(b) and top(c) of the nickel-base alloy coating clad by laser<sup>[24]</sup>

添加适量的微量元素能促进原有硬质相分解形成新的化合物或增强相,有利于提高涂层的硬度和耐磨性。Ding 等<sup>[25]</sup>研究了激光熔覆制备添加 Ti 元素的 VN 增强钴基涂层的性能,结果发现:添加 Ti 元素形成了 TiN 和 VC 硬质颗粒,提高了镍基涂层的硬度和耐磨性。Feng 等<sup>[26]</sup>研究发现,添加 Al 元素促进了单相 bcc 固溶体含量增加,与固溶强化效应协同作用,提升了涂层的硬度和摩擦磨损性能。

## 2 高熵合金涂层

高熵合金是由 5 种或更多种元素等物质的量

比或接近等物质的量比组成的一种新型合金,表现出高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应、鸡尾酒效应,使其具有优异的高温力学性能、高温抗氧化性能、耐摩擦磨损性能、耐蚀性能等<sup>[27-28]</sup>。高熵合金涂层已成为近年来激光熔覆制备合金涂层的研究热点。

热力学的高熵效应使合金原子偏析和无序化,高熵合金涂层会形成硬度较高的单一相结构,进而改善涂层的耐磨性。王海威等<sup>[29]</sup>研究表明,FeCoCrNiMn 高熵合金涂层由单相 fcc 固溶体组成,涂层未产生明显裂纹等缺陷,显微硬度约为不

锈钢基体的两倍,耐磨性明显优于 201 不锈钢基体。江迪等<sup>[30]</sup>研究了预置体尺寸与凝固过程对 FeCrCoMn 高熵合金涂层组织性能的影响,结果表明,随着预置体宽度的增加,凝固冷却速率降低,高硬度  $\sigma$  相析出,涂层硬度升高,从而改变了高熵合金涂层的耐磨性能。

高熵合金涂层的显微组织对其性能有重要影响。赵时璐等<sup>[31]</sup>研究表明: TiZrNbV 高熵合金涂层组织主要由树枝晶和枝晶间组织组成,与基体

相比具有更高的硬度和耐磨性能。张世钦等<sup>[32]</sup>采用激光熔覆技术在 27SiMn 钢表面制备了 FeCoCrNiMo<sub>0.75</sub> 高熵合金涂层,研究发现,涂层与基体结合区组织以平面晶及胞状晶为主,中部区域以柱状枝晶和少量胞状枝晶为主,顶部区域以等轴晶及细小的胞状晶为主,如图 4 所示。涂层主要物相为 fcc 相和四方结构的  $\sigma$  相,硬度高达 526 HV,约为基体的 2 倍。

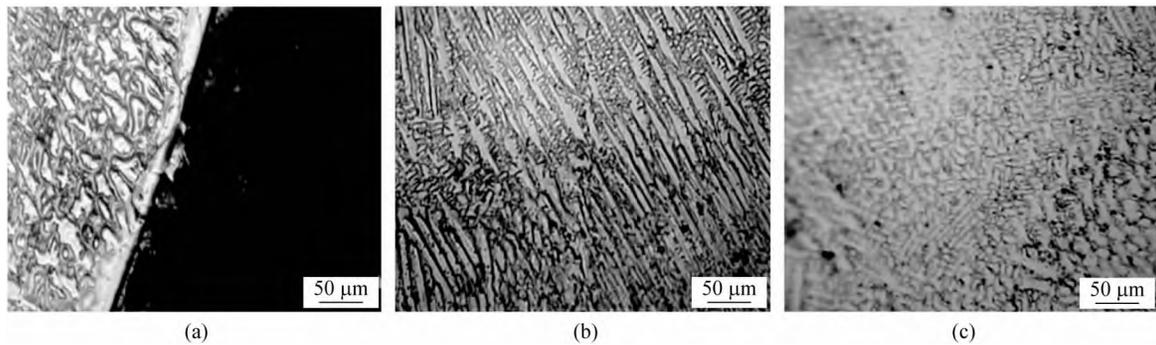


图 4 激光熔覆 FeCoCrNiMo<sub>0.75</sub> 高熵合金涂层的结合区 (a)、中间区 (b) 和顶部 (c) 显微组织<sup>[32]</sup>

Fig. 4 Microstructures in the binding area (a), intermediate area (b) and top (c) of the FeCoCrNiMo<sub>0.75</sub> high-entropy alloys coating clad by laser<sup>[32]</sup>

高熵合金的晶格畸变效应和组元成分的多元性,导致其晶格点阵具有明显的畸变,使合金系统自由能提升,对高熵合金涂层的性能产生显著影响。张泽疆等<sup>[33]</sup>研究发现:加入 Si 元素导致晶格畸变,产生了第二相强化,高熵合金涂层的显微硬度约为基体的 2.52 倍。吉丽等<sup>[34]</sup>研究表明,在 FeCoNiSiB 高熵合金中掺杂 Al、Mn 等元素,可有效提升合金的磁性能。晁理想等<sup>[35]</sup>研究表明,添加适量的 Ti 元素,可有效抑制析出相的产生,使高熵合金的屈服强度略有下降,塑性明显提升。

### 3 非晶合金涂层

非晶合金是合金在快速冷却时原子不能长程有序排列,元素分布均匀、无偏析,结晶形成无晶粒晶界和缺陷的新型材料,具有优异的力学、物理和化学性能<sup>[36]</sup>。相比于传统的晶态合金,非晶合金涂层具有更高的弹性模量、屈服强度和更优的耐磨耐蚀性能,但存在非晶相含量较低、涂层稀释率高和易出现脆性裂纹等问题<sup>[37]</sup>,制约了其工程化应用。激光熔覆技术能有效促进非晶合金涂层的制备和应用,非晶合金涂层已成为激光熔覆制备合金涂层研究的新方向。

非晶相的含量和分布是影响非晶涂层硬度和耐磨性的关键因素。Gargarella 等<sup>[38]</sup>采用激光熔覆技术制备了 FeCoBNbSi 非晶合金涂层,研究发现,涂层相组成为非晶相,富含 Fe 和 Co 的  $\delta$  相及 (Fe, Co)<sub>2</sub>B 相,由于非晶含量和相的影响,非晶涂层硬度可达 1 040 HV 0.5,约为基体的 6 倍。向南鑫等<sup>[39]</sup>研究表明,采用激光熔覆制备的 Fe-Cr-B-Si 非晶合金涂层的非晶体区比晶体区硬度提高约 200 HV,当非晶相分布于涂层顶部时,会显著提高涂层的表面硬度和耐磨性。夏平等<sup>[40]</sup>利用高速激光熔覆技术在 27SiMn 钢表面制备了 Fe 基非晶涂层,涂层显微组织如图 5 所示。可见涂层底部晶化后晶粒尺寸较小,存在严重的晶化转变现象,中部和顶部存在大面积非晶相组织,涂层顶部存在一定范围的非晶相组织及细小晶粒,涂层硬度达 1 200 HV,约为基体的 5 倍。

欧阳昌耀等<sup>[41]</sup>研究了在 304 不锈钢表面激光熔覆铁基非晶合金涂层产生裂纹的成形机制,结果表明,裂纹主要是由热影响区较大的热应力以及 C、Si 元素偏析形成的高熔点和硬度的碳

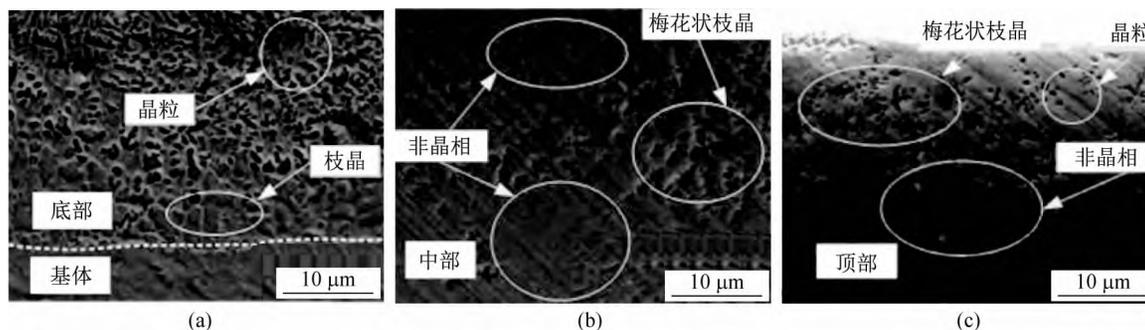


图5 激光熔覆 Fe 基非晶合金涂层的底部(a)、中部(b)和顶部(c)显微组织<sup>[40]</sup>

Fig.5 Microstructures at the bottom(a), middle(b) and top(c) of the iron-base amorphous alloy coating clad by laser<sup>[40]</sup>

硅化物造成的。Li 等<sup>[42]</sup>研究发现, Fe-Co-B-Si-Nb 非晶涂层残余拉应力和热膨胀系数均与扫描速度呈负相关, 提高扫描速度有利于抑制非晶涂层开裂。

#### 4 结束语

激光熔覆技术能以较低成本制备出与基体冶金结合、无气孔裂纹且使用性能优异的涂层, 具有广阔的发展前景。未来应在合金涂层材料种类、激光熔覆工艺参数、激光熔覆辅助技术等方面开展进一步研究。

(1) 研发新型合金涂层材料。制备高性能和高质量合金涂层是激光熔覆领域的研究重点, 以强化效果为导向, 对涂层结构及熔覆技术进行针对性的设计和规划, 建立热物理化学性能数据库, 调控涂层的成分、组织等, 加快耐磨涂层材料及其他功能型涂层的研发。

(2) 探究影响合金涂层质量的作用机制。重点研究高熵合金涂层的非晶化现象, 非晶相含量较低、涂层稀释率高、涂层易出现脆性裂纹的原因, 增强相含量和形状对合金涂层的影响等作用机制, 提升合金涂层的耐磨耐蚀性能。

(3) 优化激光熔覆工艺参数。涂层材料与基体表面同时融化形成熔池后再成型极易受激光工艺参数的影响, 通过优化制备合金涂层的激光功率、扫描速率和送粉速率等工艺参数减少涂层的缺陷, 改善涂层的质量和性能, 获取性能优异的涂层。

(4) 开发激光熔覆辅助技术。开发感应加热激光熔覆、超声波辅助激光熔覆、电磁辅助激光熔覆、超高速激光熔覆、激光熔覆 + 堆焊、激光熔

覆 + 重熔等技术, 结合激光增材制造控形、控性技术, 实现材料—结构—性能一体化再制造技术的应用, 提高合金涂层的质量。

#### 参考文献

- [1] 徐滨士, 夏丹, 谭君洋, 等. 中国智能再制造的现状与发展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 1-13.
- [2] 温家浩, 丁永春, 赵智奎. 增材修复技术应用现状及展望[J]. 应用激光, 2023, 43(1): 109-118.
- [3] MARIANI F E, RIBEIRO K S B, LOMBARDI A N, et al. Effect of laser polishing post processing technique on the roughness and wear resistance of Inconel 625 deposited by laser cladding on AISI 304L stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(9): 6713-6721.
- [4] 张斌, 陈岁元, 梁京, 等. 短应力线轧机激光再制造现状及发展趋势[J]. 材料工程, 2019, 47(11): 43-52.
- [5] SHI C, LEI J B, ZHOU S F, et al. Microstructure and mechanical properties of carbon fibers strengthened Ni-based coatings by laser cladding: the effect of carbon fiber contents [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 744: 146-155.
- [6] 施建军, 操光辉. 激光选区熔化制备的 Inconel718 合金抗氧化性能研究[J]. 上海金属, 2023, 45(6): 55-62.
- [7] 宋鹏芳, 姜芙林, 王玉玲, 等. 激光熔覆制备高熵合金涂层研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 242-252, 286.
- [8] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 32-55.
- [9] 于坤, 祁文军, 李志勤. TA15 表面激光熔覆镍基和钴基涂层组织和性能对比研究[J]. 材料导报, 2021, 35(6): 6135-6139.
- [10] 孙暄, 胡斌, 熊智慧, 等. 航空航天领域用增材制造金属材料的研究进展[J]. 上海金属, 2024, 46(3): 1-15.
- [11] LI K Y, LIANG J, ZHOU J S. Preparation and characterization of laser clad FeCrMoBSi amorphous composite coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 423(2): 127520.
- [12] 黄思语, 王水波. 感应熔覆制备镍基合金涂层的研究进展

- [J]. 表面技术, 2017, 46(6): 39-47.
- [13] ZHANG Z, KONG F R, KOVACEVIC R. Laser hot-wire cladding of Co-Cr-W metal cored wire [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 105998.
- [14] ZHANG S, HAN B, LI M, et al. Investigation on solid particles erosion resistance of laser clad CoCrFeNiTi high entropy alloy coating [J]. *Intermetallics*, 2021, 131(9): 107111.
- [15] 姚芳萍, 房立金, 李金华, 等.  $Y_2O_3$  对激光熔覆 Stellite156 钴基合金涂层的作用机制 [J]. *稀有金属与硬质合金*, 2021, 49(4): 29-34.
- [16] 尹燕, 李志慧, 李辉, 等. 铸轧辊套表面超高速激光熔覆钴基熔覆层高温耐磨性能 [J]. *焊接学报*, 2021, 42(9): 81-89, 101-102.
- [17] 周丹, 郭计山, 熊大辉, 等. TiC 含量对钴基复合涂层组织与磨损性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2025, 54(3): 134-138.
- [18] PENG R F, ZHANG M, LI Y H, et al. Microstructural development and wear properties analyses of Fe-based coatings on bainitic steel by laser cladding [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2022, 29(4): 687-697.
- [19] 孙允森, 韩阳, 张义, 等. 激光熔覆 304 不锈钢微观组织研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 292-300.
- [20] WANG C, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Phase evolution and wear resistance of in situ synthesized  $V_8C_7$  particles reinforced Fe-based coating by laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 105: 58-65.
- [21] 张华健, 孙中刚, 李峰, 等. 激光熔覆铁基复合涂层组织与性能影响 [J]. *表面技术*, 2018, 42(12): 127-133.
- [22] 崔静, 李洪威, 杨广峰. 60% wt WC 镍基涂层组织及耐磨性研究 [J]. *激光与红外*, 2023, 53(11): 1677-1681.
- [23] 杨尚武, 瞿海霞, 黎恒君, 等. 激光熔覆 (Ti, W) C 增强镍基涂层的性能 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(7): 953-959, 1019.
- [24] 周志杰, 许磊, 杜彦斌, 等. 20Cr13 钢表面激光熔覆铁/镍基合金熔覆层的组织与性能研究 [J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(2): 69-74.
- [25] DING L, HU S S, QUAN X M, et al. Effect of Ti on the microstructure evolution and wear behavior of VN alloy/Co-based composite coatings by laser cladding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252: 711-719.
- [26] FENG X L, WANG H F, LIU X C, et al. Effect of Al content on wear and corrosion resistance of Ni-based alloy coatings by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 412: 126976.
- [27] 盛剑, 李大赵, 闫志杰, 等. FeMnCoCrNi 高熵合金高温力学性能及变形机制研究现状 [J]. *金属热处理*, 2024, 49(10): 211-220.
- [28] 耿在明, 魏鑫, 张磊, 等. 激光熔覆抗磨抗蚀涂层研究现状与发展趋势 [J]. *材料导报*, 2024, 38(增刊1): 418-422.
- [29] 王海威, 肖文波. 高速激光熔覆 FeCoCrNiMn 高熵合金熔覆层组织及耐磨性研究 [J]. *矿冶工程*, 2024, 44(5): 148-152.
- [30] 江迪, 张树玲, 吴苏瑞, 等. 激光熔覆 FeCrCoMn 高熵合金涂层的组织和摩擦学性能 [J]. *钢铁研究学报*, 2024, 36(11): 1460-1470.
- [31] 赵时璐, 吴精诚, 马国峰, 等. Q235 钢表面激光熔覆 TiZrNbV 高熵合金涂层工艺及性能 [J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2024, 36(6): 464-468, 546.
- [32] 张世钦, 周娟, 刘弘, 等. 27SiMn 钢表面激光熔覆 FeCoCrNiMo<sub>0.75</sub> 高熵合金涂层组织与耐磨性能 [J]. *机械工程师*, 2024(11): 95-98.
- [33] 张泽疆, 李新梅. 激光熔覆 CoCrFeNiSi<sub>x</sub> 高熵合金涂层的耐磨和耐蚀性能 [J]. *材料研究学报*, 2024, 38(10): 741-750.
- [34] 吉丽, 杨斯蒙, 俞然, 等. Al, Mn 掺杂对 FeCoNiSiB 高熵合金的非晶形成能力和磁性能的影响 [J]. *功能材料*, 2024, 55(11): 11132-11136.
- [35] 晁理想, 徐明沁. Ti 含量对 TiZrNbMoV 难熔高熵合金组织与力学性能的影响 [J]. *机械制造与自动化*, 2024, 53(5): 33-36.
- [36] 皮自强, 杜开平, 郑兆然, 等. 铁基非晶合金涂层的研究进展 [J]. *热喷涂技术*, 2020, 12(4): 1-11.
- [37] 齐泓钧, 坚永鑫, 陈子晗, 等. 超高速激光熔覆技术及其耐腐蚀涂层材料研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2024, 53(16): 1-8.
- [38] GARGARELLA P, ALMEIDA A, VILAR R, et al. Formation of Fe-based glassy matrix composite coatings by laser processing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 240: 336-343.
- [39] 向南鑫, 周后明, 王宇豪, 等. 高速激光熔覆铁基非晶合金涂层的组织及性能研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(17): 282-291.
- [40] 夏平, 黄海博. 高速激光熔覆液柱表面耐磨耐蚀 Fe 基非晶涂层制备工艺研究 [J]. *煤矿机械*, 2024, 45(9): 93-96.
- [41] 欧阳昌耀, 白峭峰, 韩斌慧, 等. 激光熔覆 Fe 基非晶合金涂层裂纹分析 [J]. *金属热处理*, 2022, 47(5): 252-256.
- [42] LI R F, YUAN W Y, YUE H Y, et al. Study on microstructure and properties of Fe-based amorphous composite coating by high-speed laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107574.

修回日期: 2024-12-24