

激光熔覆铁基合金涂层的研究进展

李垚焱¹, 谭诚香¹, 李梦瑶¹, 田煜博¹, 王然¹, 张亚龙¹,
王茜^{1*}, 张峻巍¹, 张亮², 叶风³

(1. 辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 抚顺隆烨化工有限公司,
辽宁 抚顺 113217; 3. 沈阳防锈包装材料有限公司, 沈阳 110033)

摘要: 激光熔覆技术作为一种先进的材料表面改性技术, 具有加工效率高、涂层稀释率低且与基体结合强度高、自动化程度高、环境友好等优点。在各类熔覆材料中, 铁基合金在成分上与钢铁材料最为接近, 且其成本相对较低, 近年来在设备零部件表面强化和再制造领域得到广泛应用。结合国内外最新研究成果, 从材料体系、工艺参数、外场辅助技术等方面对激光熔覆铁基合金涂层的研究进展进行了综述。总结了熔覆材料的选材依据以及铁基自熔性合金粉末、不锈钢粉末、铁基非晶合金粉末、铁基复合粉末等各类材料的特点和应用。系统讨论了激光功率、扫描速度、光斑直径、送粉速率等工艺参数对铁基涂层成形质量和微观组织及性能的影响机制, 并介绍了工艺参数优化在高质量熔覆层制备中的应用。同时, 论述了超声振动、电磁场、温度场等外场辅助技术在激光熔覆铁基合金涂层中的应用, 阐明了外加能场对激光熔覆过程中熔池及凝固组织的作用机理。最后对激光熔覆铁基合金涂层未来的发展方向进行了展望。

关键词: 激光熔覆; 铁基涂层; 研究进展; 材料体系; 工艺参数; 外场辅助

中图分类号: V261.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)06-0011-17

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.06.002

Research Progress of Laser-cladding Fe-based Alloy Coating

LI Yahan¹, TAN Chengxiang¹, LI Mengyao¹, TIAN Yubo¹, WANG Ran¹, ZHANG Yalong¹,
WANG Qian^{1*}, ZHANG Junwei¹, ZHANG Liang², YE Feng³

(1. School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Liaoning
Anshan 114051, China; 2. Fushun Longye Chemical Co., Ltd., Liaoning Fushun 113217, China;
3. Shenyang Packaging Materials Co., Ltd., Shenyang 110033, China)

ABSTRACT: As an advanced material surface modification technology, laser cladding uses laser beam with high energy density as the heat resource. By melting and solidifying the cladding material and substrate surface rapidly and simultaneously, the cladding layer with specific properties can be prepared on the substrate. Compared with other technologies, laser cladding has the advantages of high processing efficiency, low dilution rate, high bonding strength with substrate, high degree of

收稿日期: 2023-03-12; 修订日期: 2023-08-13

Received: 2023-03-12; **Revised:** 2023-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51874091, 52101087); 教育部产学研合作协同育人项目 (220607018162819); 辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目 (S202310146035)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51874091, 52101087); University-Industry Collaborative Education Program of Ministry of Education (220607018162819); Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students in University of Science and Technology Liaoning (S202310146035)

引文格式: 李垚焱, 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 Yahan, TAN Chengxiang, LI Mengyao, et al. Research Progress of Laser-cladding Fe-based Alloy Coating[J]. Surface Technology, 2024, 53(6): 11-27.

*通信作者 (Corresponding author)

automation and environmental friendliness, thus it has been successfully applied in machining, transportation, petrochemical and other fields. Among all kinds of cladding materials, Fe-based alloys are most similar to steel materials in composition, and their cost is relatively low compared with that of Ni-based and Co-based alloys. In recent years, Fe-based alloys have been widely used in the fields of surface strengthening and remanufacturing of equipment parts. Based on the latest studies in China and abroad, the research progress of laser cladding Fe-based alloy coatings is reviewed from the aspects of material system, process parameter, and application of external field auxiliary technology. Cladding materials play a crucial role in the properties of the coatings. The compatibility, wettability, chemical composition, and physical property differences between the cladding materials and substrate materials should be fully considered on the basis of working condition and performance requirement for selection of cladding materials. The characteristics and applications of various materials including Fe-based self-fluxing alloy powder, stainless steel powder, amorphous alloy powder, and Fe-based composite powder are summarized. The process parameters during the laser cladding process also play a significant role in the deposition rate, forming quality, phase composition, microstructure, and comprehensive properties of the coatings. The effect mechanisms of process parameters such as laser power, scanning speed, laser spot diameter, and powder feeding rate on the forming quality, microstructure, and properties of Fe-based coatings are systematically discussed. It is worth noting that actual laser cladding process is the interaction between multiple parameters, which can lead to a complex nonlinear relationship between the process parameters and quality of the cladding layers. Thus, the application of process parameter optimization in the preparation of high quality coatings is also introduced. Moreover, reasonable cladding material design and optimization of laser cladding process parameters can reduce the number of defects in the coating to a certain extent, but it is still difficult to completely eliminate the cracks in Fe-based coatings with high hardness. Meanwhile, the solidification characteristics of laser cladding through rapid heating and cooling can result in insufficient diffusion of elements in the molten pool, resulting in poor microstructure uniformity of the cladding layer, which ultimately affects its performance. Therefore, the applications of external field auxiliary technologies including ultrasonic vibration field, electromagnetic field, and temperature field in the laser cladding of Fe-based alloy coating are discussed in detail. The mechanism of external energy field on the melting pool and solidification structure during the laser cladding process is illustrated. Finally, the future development direction of laser cladding Fe-based alloy coating is prospected.

KEY WORDS: laser cladding; Fe-based coating; research progress; material system; process parameter; external field auxiliary

激光熔覆是一种先进的表面改性和修复技术,它利用高能量密度的激光束作为热源,通过将熔覆材料和基体材料快速熔化并凝固,在基体表面形成具有耐磨损、耐腐蚀等性能的强化层^[1-2]。与其他表面改性技术相比,激光熔覆具有沉积速率快、基材稀释率低、涂层与基体呈良好的冶金结合、自动化程度高、环境友好、适用于各种工件形状等一系列优点,因而被广泛应用于机械加工、交通运输、石油化工等领域设备零部件的表面强化和修复再制造^[3-7]。激光熔覆制备的涂层性能与熔覆材料直接相关,常用的金属材料体系主要有铁基合金、镍基合金、钴基合金三类。其中铁基合金与机器零部件用钢在成分上最为接近,涂层与基体相容性好、结合强度更高,与镍基和钴基合金相比,铁基合金成本相对较低^[8]。因此,近些年激光熔覆铁基合金涂层在科学研究和工程应用领域均得到越来越多的关注。

本文将从材料体系、工艺参数、外场辅助技术等方面对激光熔覆铁基合金涂层的国内外最新研究成果进行综述,总结了不同类型铁基合金的特点及其在激光熔覆中的应用,讨论了激光熔覆工艺参数对铁基涂层成形质量和微观组织的影响机制,阐述了外加能

场对激光熔覆过程中熔池及凝固组织的作用机理,最后对激光熔覆铁基合金涂层研究领域下一阶段的发展方向进行了展望。

1 激光熔覆铁基合金涂层材料体系

熔覆材料对涂层的性能起着决定性作用。选择熔覆材料时,在结合工况条件和性能要求的基础上,应充分考虑熔覆材料与基体材料之间的相容性、润湿性、化学成分及物理性能差异^[9]。根据熔覆材料的成分,目前常用的铁基合金涂层材料体系包括铁基自熔性合金粉末、不锈钢粉末、铁基非晶合金粉末、铁基复合粉末等^[10]。

1.1 铁基自熔性合金粉末

铁基自熔性合金粉末成本低廉、来源广泛,其化学成分与碳钢、铸铁等机器零件用钢相近,常用于零部件表面修复或强化^[11]。其成分设计是基于不锈钢和高铬铸铁,在此基础上添加 Si、B 等元素。合金中的 Fe、Cr、W 等元素可以与 C 结合生成碳化物硬质相; Ni 元素能够改善熔覆层的韧性,降低其开裂倾向;

Si、B 元素在熔覆过程中优先与氧结合, 在熔池表面生成玻璃态氧化物, 阻止下方液态金属的氧化, 同时还可改善熔池与基体间的润湿性。Wang 等^[12]以商用 Fe901 自熔性合金粉末为原料, 在 316 不锈钢表面激光熔覆了 FeCrBSi 涂层。涂层主要由马氏体基体、 $(\text{Fe, Cr})_7\text{C}_3$ 和 CrFeB 硬质相组成, 如图 1 所示, 从熔覆层顶部到结合区依次分布着等轴枝晶、网状枝晶、柱状枝晶、胞状晶和平面晶。枝晶组织中出现了成分偏析, Cr 和 B 元素主要分布在枝晶间区域。FeCrBSi 涂层在 1 073 K 的熔融铝液中表现出较高的耐腐蚀性能。Li 等^[8]将不同比例的硼铁粉添加至 Fe901 合金粉末中, 研究了硼元素含量对激光熔覆铁基涂层组织和耐磨性能的影响。结果表明, 涂层中的硼含量对硼化物析出相的形态和数量有显著影响。当硼质量分数从 1.6% 增加到 6.0% 时, 涂层组织中硼化物相所占比例逐渐增大, 形态经历了从网状→簇状→长条状→块状的变化。添加硼可以有效提高铁基涂层的显微硬度和耐磨性, 且涂层中硼含量越高, 作用越明显。研究通过对熔覆层的组织、物相、硬度与摩擦磨损性能进行分析, 探讨了材料的强化及磨损机制, 为激光熔覆铁基耐磨涂层的推广应用提供理论与数据基础。Peng 等^[13]以铁基自熔性合金粉末为原料, 利用高速激光熔覆技术在贝氏体钢表面沉积了耐磨铁基涂层。研究表明, 激光扫描速度越快, 熔池冷却速度越快, 枝晶间元素分布越不均匀。通过对比摩擦因数、磨损量和磨损形貌, 发现涂层的耐磨性随扫描速度的增加而增大, 这主要与涂层组织细化以及共晶含量的增加有关。但尚未阐明富含 Cr、Mo 和 B 的枝晶间组织在铁基合金凝固过程中发生组织偏析这一现象。

1.2 不锈钢粉末

按照组织状态划分, 不锈钢涂层可分为奥氏体不

锈钢涂层、马氏体不锈钢涂层、铁素体不锈钢涂层、双相不锈钢涂层等。将激光熔覆技术应用于不锈钢涂层的制备中, 能够改善基体的表面性能^[14-15]。目前, 关于激光熔覆不锈钢涂层的研究主要集中于奥氏体不锈钢和马氏体不锈钢^[16]。

1.2.1 奥氏体不锈钢

奥氏体不锈钢具有良好的塑韧性和焊接性, 且在多种介质中均具有良好的耐蚀性^[17]。Mahmond 等^[15]在低碳钢基体表面激光熔覆了 316L 不锈钢涂层, 并讨论了激光功率对涂层微观组织和结合质量的影响。在较高的激光功率 (2.4 kW 和 2.8 kW) 下, 316L 不锈钢涂层与基体结合良好, 没有任何宏观缺陷, 组织主要为相互平行的柱状枝晶; 当功率为 2.0 kW 时, 涂层出现了一些裂纹缺陷, 组织呈不规则方向的胞状枝晶状。He 等^[18]同样采用激光熔覆技术制备了 316L 不锈钢涂层, 并对比研究了固溶处理前后涂层的摩擦磨损和腐蚀磨损性能。结果表明, 固溶处理可以有效改善涂层的耐磨性和耐腐蚀磨损性能。此外, 腐蚀介质能够加速涂层的磨损行为, 316L 不锈钢涂层腐蚀磨损的典型失效机制为磨粒磨损和塑形变形。孙允森等^[17]通过对 304 不锈钢激光熔覆层的微观组织进行分析, 发现熔覆层由 γ 基体相和 σ 析出相组成。基体相为细小致密的枝晶状组织, σ 相主要由接近等原子比的 Fe 和 Cr 元素构成, 后者以长条状、网状或颗粒状分布于枝晶间隙处。

1.2.2 马氏体不锈钢

马氏体不锈钢具有高硬度和优异的耐磨性, 常被用于耐磨零部件的表面强化^[19-20]。例如, 为改善大型风电轴承滚道的表面性能, 冯育磊等^[5]在其模拟件表面激光熔覆了硼调控的 4Cr13 马氏体不锈钢涂层。激光熔覆流程如图 2 所示, 通过基体预热和熔覆后的缓

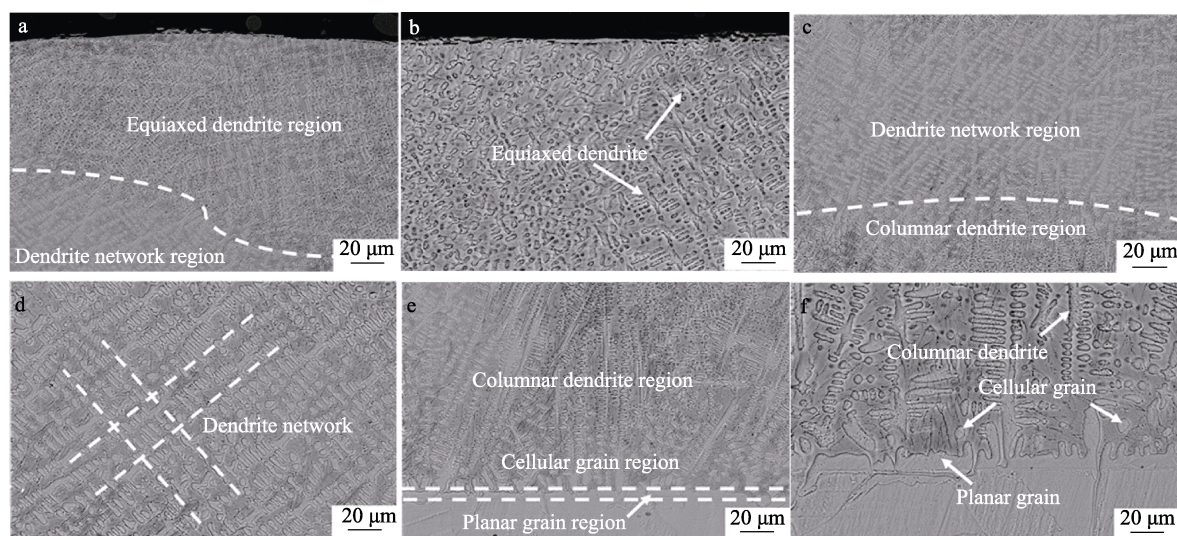
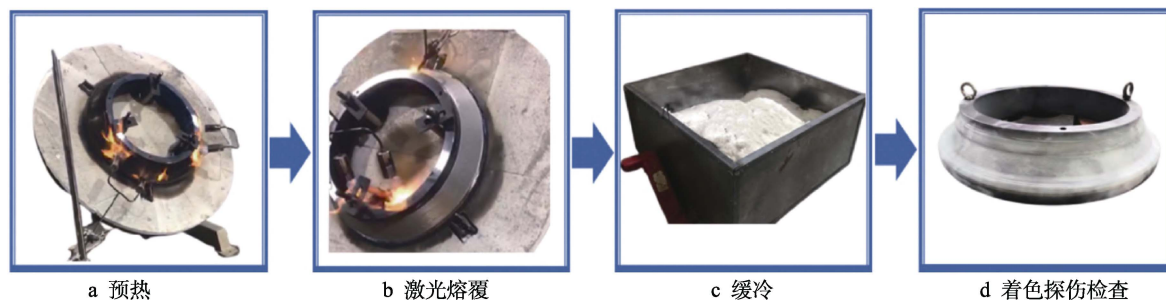


图 1 FeCrBSi 涂层的 SEM 显微照片: a-b) 顶部区域; c-d) 中间区域; e-f) 底部区域^[11]
Fig.1 SEM micrographs of the FeCrBSi coating: a-b) top region; c-d) middle region; e-f) bottom region^[11]

图2 风电轴承滚道模拟件的激光熔覆流程图^[5]Fig.2 Flow chart of laser cladding of wind power bearing raceway simulator: a) preheat; b) laser cladding; c) slow cooling; d) dye penetration inspection^[5]

冷处理,可以制备出厚度大于3 mm、无裂纹的高硬涂层。涂层主要由马氏体基体、少量残余奥氏体及晶间分布的 M_2B 、 $M_{23}C_6$ 增强相组成。与42CrMo基体相比,马氏体不锈钢涂层的耐磨性和耐蚀性均明显提升。本试验所用技术在风力发电领域具有广阔的应用前景,但试验温度区间较大,需在200~1 500℃之间进行操作。

1.2.3 铁素体不锈钢

铁素体不锈钢Cr含量较高,具有抗氧化性好、热膨胀系数小等特点,且在含氯介质中展现出优良的耐腐蚀性能。Li等^[21]采用激光熔覆和激光重熔相结合的技术,在低碳钢表面沉积了UNS S44700超级铁素体不锈钢。熔覆层由内层未重熔区和外层重熔区组成,重熔区组织为细小的柱状枝晶态铁素体,重熔处理能够缓解组织的不均匀性。铁素体不锈钢熔覆层在0.5 mol/L NaCl、1 mol/L $FeCl_3$ 和0.6 mol/L HCl溶液中均表现出优异的钝化性能和抗点蚀性能。

1.2.4 双相不锈钢

双相不锈钢兼具铁素体和奥氏体不锈钢的优点,具有较高的屈服强度和优异的抗点蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳性能。计东生^[22]采用激光熔覆技术制备了Nb合金化的双相不锈钢涂层,研究了Nb含量对熔覆层组织、力学性能和耐腐蚀性能的影响。随着涂层中Nb含量的增加,涂层组织中铁素体的含量增加,组织均匀化和细化程度得到改善。Nb元素的添加能够有效提高涂层的耐腐蚀性能,当Nb添加量为1.5%时,双相不锈钢涂层的耐蚀性最佳。Liu等^[23]采用激光熔覆技术在Q235钢表面制备了单道2205双相不锈钢涂层,并讨论了激光功率对涂层形貌特征、显微组织、硬度和耐蚀性的影响。试验结果表明,随着激光功率从1.7 kW增加至2.7 kW,熔覆层的宽度、熔池深度和稀释率均逐渐增大。当激光功率为2.3 kW时,涂层具有均匀细小的显微组织、最高的显微硬度和最佳的耐蚀性,其腐蚀电位为-0.146 V,腐蚀电流密度仅为0.13 $\mu A/cm^2$ 。

通过以上分析可以看出,不锈钢具有良好的耐腐蚀性、高硬度、高韧性等特点,可以作为激光熔覆涂

层材料来提高基体的耐腐蚀性、耐磨性和耐疲劳性能。但是,不锈钢涂层与中高碳钢基体结合区的元素互扩散,易导致界面处发生增碳脆化现象,而目前相关研究较少。后续应围绕不锈钢熔覆层与基体结合区的精细组织、元素分布及力学性能等方向进一步开展研究工作,以实现对接面的强韧化调控。

1.3 非晶合金粉末

铁基非晶合金具有高强度、高硬度和优异的耐腐蚀性,且其成本相对较低,目前已成为非晶研究领域的热点^[24-25]。将激光熔覆冷却速度快的特点应用于铁基非晶的制备,有利于保留其非晶结构特征和性能,同时涂层形式还可以在一定程度上解决非晶合金的室温脆性及尺寸限制问题。Li等^[25]采用激光熔覆技术制备了FeCrMoBSi非晶复合涂层,并讨论了Cr含量对涂层非晶形成能力和力学性能的影响。研究表明,涂层主要由铁基固溶体、非晶相及少量金属间化合物组成;适当含量的Cr元素能够有效抑制金属间化合物的形成,并降低枝晶的取向生长趋势。随着Cr含量的增加,涂层的微观组织由等轴枝晶逐渐转变为非晶相与晶相的混合组织;当铁铬比为0.33时,涂层展现出最佳的非晶形成能力。高硬度和弹性模量的非晶相可以显著提高涂层的耐磨性,随着涂层中非晶相含量的增加,涂层的磨损机制由严重剥落磨损和氧化磨损逐渐转变为轻微的磨粒磨损。Li等^[26]采用高速激光熔覆技术在45中碳钢表面以不同扫描速度沉积了Fe-Co-B-Si-Nb非晶涂层。结果表明,随着扫描速度的提高,涂层表面粗糙度、残余拉应力和热膨胀系数均降低,而冷却速度不断增大;当扫描速度增大至80.38 m/min时,涂层顶部的冷却速度可达 1.08×10^5 °C/s,大大提高了非晶相的形成能力。随着涂层组织中非晶相体积分数的增加,涂层的硬度和耐磨性均得到提升。但是需要指出的是,一般很难通过激光熔覆获得完全的非晶涂层,且非晶涂层组织中非晶含量偏低^[2]。

1.4 铁基复合粉末

铁基复合涂层是在铁基合金粉末中添加以硬质

陶瓷颗粒为主的增强相, 通过对复合粉末进行激光熔覆, 可以在基体表面获得具有特殊性能的铁基复合涂层^[27-29]。同时, 还可以通过原材料之间的化学反应在铁基涂层中原位生成增强相^[30-31]。复合涂层可以充分发挥铁基合金基体和增强相各自的特性, 与纯金属涂层相比具有更高的强度、硬度以及更好的耐磨性和耐腐蚀性。此外, 通过调整复合粉末中增强相的种类、含量、粒径等因素, 可以实现对复合涂层组织和性能的调控。表 1 总结了国内外关于激光熔覆铁基复合涂层的报道。

WC 具有高熔点、高硬度、低热膨胀系数、与铁基材料润湿性好等优点, 因此 WC 颗粒是铁基熔覆层中常用的硬质增强相^[9]。Li 等^[39]采用激光熔覆技术在 16Mn 钢表面制备了不同粒径 WC 颗粒增强的铁基复合涂层, 并详细分析了 WC 颗粒尺寸对复合涂层组织和性能的影响。通过对比 4 种铁基熔覆层(不含 WC、小尺寸 WC、混合尺寸 WC 以及大尺寸 WC)的物相组成、微观组织、显微硬度和耐磨性, 发现 WC 尺寸对复合涂层的物相组成影响很小, 但对其微观组织有显著影响。小尺寸 WC 对涂层组织的均匀化和细化有积极作用, 且小尺寸 WC 对涂层的强化作用远大于大尺寸 WC^[34]。他们还以不同配比的 Fe60 合金粉末和 WC 颗粒为原材料, 在 16Mn 钢表面激光熔覆了原位合成(Cr, W)₂₃C₆-WC 陶瓷增强铁基复合涂层, 讨论了

WC 添加量对复合涂层组织和耐磨性能的影响。研究表明, 添加 20% (质量分数) WC 的复合涂层具有最佳的显微硬度和耐磨性, 这主要归因于其组织中分布的连续网状(Cr, W)₂₃C₆-WC 复合陶瓷相。当 WC 质量分数增大至 30%时, 由于增强相的团聚以及内应力的增加导致涂层出现开裂。

Ti、Nb、V 等强碳化物形成元素也常被添加到铁基合金粉末中, 利用原位反应直接在熔覆层中生成碳化物强化相^[40-42]。例如, Zhang 等^[43]采用激光熔覆原位合成了 MC (M: Ti、Nb) 碳化物增强 316L 涂层。研究发现, 随着碳化物含量的增加, 原位生成的(Ti, Nb)C 颗粒的尺寸和形貌发生变化; 碳化物质量分数从 2.5%增加到 15%时, 原位生成的(Ti, Nb)C 的形貌从不规则几何颗粒演变为球形颗粒再到平衡八面体结构, 此时表现出较低的摩擦因数和磨损体积损失。Wang 等^[44]采用激光熔覆技术在 35CrMo 钢表面制备 V₈C₇ 增强铁基复合涂层, 并研究涂层的相组成、显微硬度和耐磨性。结果表明, 涂层主要由 V₈C₇、 α -Fe、Cr₇C₃、Mo₂C 和 Fe₃C 组成; 在第二相、固溶及细晶强化的共同作用下, 涂层的显微硬度是基体的 4 倍, 磨损损失仅为基体的 1/26, 在基体中原位生成的 V₈C₇ 颗粒显著提高了涂层的耐磨性。上述试验研究了铁基复合涂层中碳化物增强相的形成规律, 并建立了增强相的微观结构和含量与涂层摩擦学性能之间的密切

表 1 部分关于激光熔覆铁基复合涂层的文献报道
Tab.1 Some literature reports on laser cladding Fe-based composite coatings

Fe-based alloy	Reinforcement	Optimal addition amount	Laser type	Average hardness	Wear resistance	References
Fe901 self-fluxing alloy	Al ₂ O ₃	10wt. %	YLS-2000-TR fiber laser	784.5HV0.2	The wear loss was 50% of that of Fe901 coating	[32]
Fe-based self-fluxing alloy	WC	60wt. %	IPG-YLS-2000 fiber laser	1 029.2HV0.2	Wear loss was 1.2 mg, wear loss rate was 0.983×10 ⁻³ mg/m	[28]
Fe60 self-fluxing alloy	Ti ₃ SiC ₂	20wt. %	LDF4000-1000 semiconductor laser	936HV0.3	Wear resistance was increased by 1 time	[33]
410 martensite stainless steel	TiC	10wt. %	FL-1500 fiber laser	634HV0.2	Wear loss rate was 0.153×10 ⁻⁵ mm ³ /(N·m)	[27]
Fe60 self-fluxing alloy	(Cr, W) ₂₃ C ₆ , WC	20wt. %	HWL-1 500 W laser system	827.2HV0.5	COF was 0.58, wear loss rate was 2.63×10 ⁻⁶ mm ³ /(N·m)	[34]
Fe104 alloy	WC	9wt. %	IPG 4 kW ytterbium fiber laser		COF was 0.313, wear loss rate was 2.719 4×10 ⁻⁶ mm ³ /(N·m)	[35]
316L stainless steel	TiB ₂	6wt. %	YLS-10000 fiber laser	186HV0.3		[36]
AISI316L stainless steel	TiC, TiB ₂	29.47vol. %	Fiber laser	961.94HV0.3	COF was 0.432	[37]
Fe _{78.5} Cr _{15.6} Ni _{4.0} Si _{0.7}	La ₂ O ₃	1wt. %	LD3000 laser system	523.76HV0.3	COF was 0.2	[38]

关系,为原位合成碳化物增强铁基复合涂层的应用提供了相关依据。

稀土元素因其独特的原子结构和优异的化学亲和性而具有优异的物理化学特性,将适量的稀土元素添加至熔覆材料中,能够细化晶粒,改善组织均匀性^[45]。Wang 等^[38]采用激光熔覆技术在 45 钢表面制备了不同 La_2O_3 添加量(质量分数为 0%、1%、2%)的 $\text{Fe}_{78.5}\text{Cr}_{15.6}\text{Ni}_{4.0}\text{Si}_{0.7}$ 铁基复合涂层。研究发现, La_2O_3 的加入可以起到细化晶粒的作用,当其添加量为 1% 时,能够完全消除组织中粗大的柱状晶粒;但是当 La_2O_3 添加量增加至 2% 时,其细晶作用减弱。 La_2O_3 的细晶强化和弥散强化作用能够提高涂层的硬度和耐磨性,且其最佳添加量为 1%。如图 3 所示,当裂纹扩展至 La_2O_3 与基体之间的界面时,必须克服两者之间的断裂应力,因此 La_2O_3 作为强化相可以有效抑制裂纹的扩展,进而提高涂层的耐磨性。

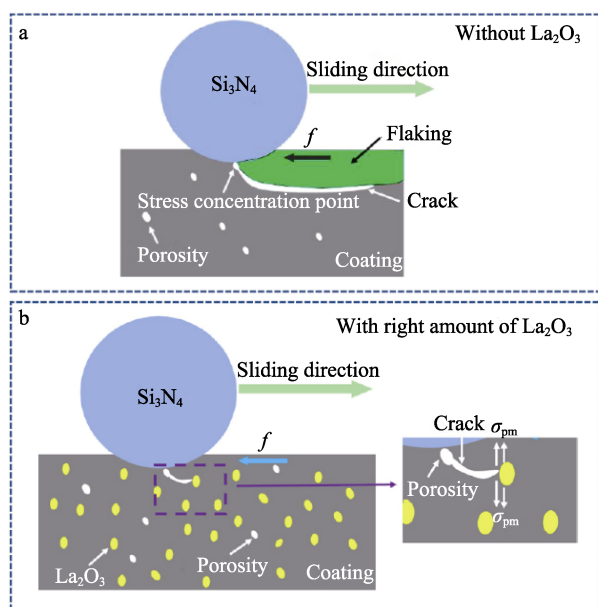


图 3 涂层应力分析示意图^[38]

Fig.3 Schematic diagram of stress analysis of coating^[38]

值得关注的是,增强相在铁基复合涂层中的存在形式及分布规律直接影响涂层的成形质量和性能。后续研究中可以通过改变铁基合金基体成分和增强相材料的种类、添加形式、尺寸等,以实现高质量复合涂层的制备及性能调控。

2 工艺参数对铁基熔覆层组织和性能的影响

熔覆材料确定后,激光熔覆过程中的工艺参数对熔覆层的沉积速率、成形质量、物相组成、微观组织和综合性能发挥着关键作用^[46-48]。工艺参数主要包括激光功率、扫描速度、光斑直径、送粉速率、离焦量、搭接率、扫描路径、载气流量等。

2.1 激光功率

激光功率是决定熔覆过程中热量输入的关键参数,对熔覆层的成形质量和性能有着显著影响^[49]。激光功率过低会导致熔池温度较低,达不到基体材料的熔点而不能使其表层熔化,因此熔覆层与基体结合强度会降低,甚至难以形成冶金结合。激光功率过高会导致熔覆材料过熔甚至气化,造成一定的浪费;同时基体熔化部分过多会导致熔覆层稀释率过大,熔覆层成分偏离原始熔覆材料,进而影响其预期性能。

Nie 等^[50]采用激光熔覆方法制备了 17-4PH 不锈钢涂层,并研究了不同激光功率(2.0、2.2、2.4 kW)对涂层成形性、组织演变规律、显微硬度和界面结合强度的影响。当激光功率为 2.2 kW 时,熔覆层稀释率适当、晶粒细小且元素间互扩散充分,因而可以获得最佳的界面结合强度。从图 4 中可以看出,样品 1(2.0 kW)和样品 3(2.4 kW)的断口形貌中出现了微孔,微孔与未熔粉末结合后能够加速裂纹的扩散,因此其抗拉强度和屈服强度均低于样品 2(2.2 kW)。李天澍等^[51]通过激光熔覆技术在 304 不锈钢基体表面制备了 Fe-TiC 复合涂层,并讨论了激光功率对熔覆层几何特征、组织及硬度的影响。研究发现,提高激光功率有利于增强熔池对流运动并提高熔池温度,使得熔覆层高度降低,宽度和熔深增加,同时组织中未熔的 TiC 颗粒数量也随着减少。

2.2 扫描速度

扫描速度是指激光光斑在基体表面的移动速度,直接关系到激光熔覆效率和熔池存在时间^[52]。扫描速度过快时,光斑在基体表面停留时间缩短,熔池存在时间短,熔覆材料不能完全熔化,从而不能得到预期熔覆效果;扫描速度过慢时,熔池持续时间过长,熔体的冷却速度降低,使得凝固组织充分生长,易形成具有组织粗大的熔覆层,对其性能产生负面影响。

Wang 等^[53]研究了不同扫描速度对激光熔覆铁基非晶/纳米晶熔覆层组织和性能的影响。结果表明,铁基涂层的非晶态含量取决于扫描速度,后者主要通过改变热输入来影响涂层的稀释率和实际冷却速率。随着扫描速度的增大,熔覆层展示出更高的硬度和更优的耐腐蚀性能,这主要归因于细晶强化、弥散强化及非晶相的强化作用。王强等^[54]分别采用高速激光熔覆和常规激光熔覆,在 27SiMn 钢基体表面制备了铁基 TY-2 合金涂层,对比了 2 种熔覆层的物相组成、微观组织及性能,并讨论了熔覆过程中能量构成对涂层的影响机制。通过对 2 种激光熔覆过程的能量参数进行分析,证明了高速激光熔覆过程中的总能量低于常规激光熔覆过程,因此可实现低能量下的高速熔覆,所制备的涂层组织细小致密,具有更高的硬度。

2.3 激光光斑直径

激光光斑直径对熔覆过程的影响机制与激光功

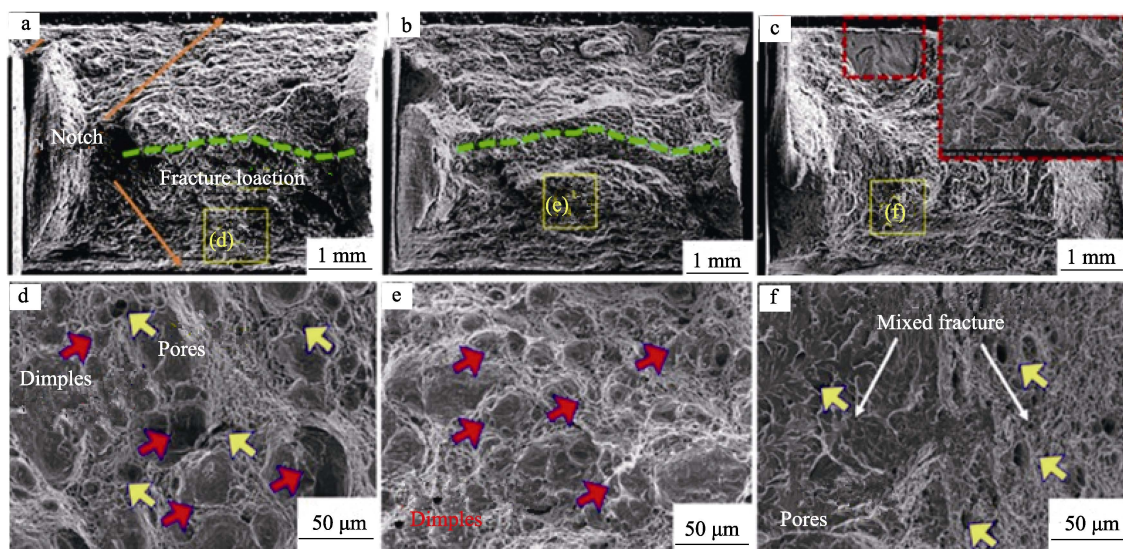


图 4 不同激光功率下试样的典型宏观断口形貌 (a~c 分别对应样品 1、样品 2、样品 3)

以及对应的微观断口形貌 (d~f 分别对应样品 1、样品 2、样品 3)^[50]

Fig.4 Typical macroscopic and microscopic tensile fractures of specimens under different laser powers (a-c refer to specimen 1, specimen 2 and specimen 3) and corresponding microscopic tensile fractures of specimens under different laser powers (d-f refer to specimen 1, specimen 2 and specimen 3)^[50]

率和扫描速度相似, 由激光能量密度计算公式可知, 光斑直径越大, 作用于熔池的激光能量密度越低。

Garcia-Herrera^[55]采用激光熔覆技术在 304 不锈钢基体上成功沉积了一种低非晶形成能力的商业铁基非晶合金, 并系统讨论了激光功率、扫描速度、光斑尺寸等工艺参数对熔覆层宏观形貌和力学性能的影响。研究表明, $\text{Fe}_{73}\text{Cr}_2\text{Si}_{11}\text{B}_{11}\text{C}_3$ 非晶合金的沉积规律与传统金属材料的激光熔覆原则相同。如图 5 所示, 样品的稀释率随激光光斑尺寸和扫描速度的增大而减小, 而激光功率对稀释率的影响较小。当激光功率为 1 200 W、扫描速度为 25 m/s、光斑尺寸为 1.94 mm 时, 熔覆层的稀释率最大为 51.2% (C5); 当激光功率为 800 W、扫描速度为 25 m/s、光斑尺寸为 2.86 mm

时, 熔覆层的稀释率最小为 6.6% (C3)。因此, 通过控制光斑尺寸和扫描速度, 可以降低非晶合金熔覆层的稀释率。同时, 在熔覆过程中施加在铁基非晶粉末的能量密度对其非晶相的形成有显著影响, 高能量密度有利于组织中 $\alpha\text{-Fe}$ 第二相的形成。

2.4 送粉速率

送粉速率对熔覆层的成形质量有重要影响。随着送粉速率的提高, 单位时间内基体表面某一区域内粉末的累积导致激光束透过率降低, 使得基体吸收的能量减少, 熔池冷却时间缩短, 冷却速度加快, 因此熔覆层晶粒尺寸变小, 组织得到细化; 同时, 在其他工艺参数不变的条件下, 提高送粉速率能够增加熔覆层的厚度。但是, 当送粉速率过高时, 激光能量的供给就会不足, 使得熔池无法达到基体材料的熔化温度, 导致熔覆层与基体不能形成有效的冶金结合。

王永霞等^[56]讨论了不同送粉速率 (0.6、0.8、1.4 r/min) 对激光熔覆铁基涂层微观组织的影响。结果表明, 随着送粉速率的增大, Q235 基体热影响区中未溶碳化物含量增多, 熔覆层底部粗大柱状晶所占比例减小, 中部树枝晶逐渐向等轴晶转变, 表层等轴晶组织得到细化。Cui 等^[57]研究发现, 当激光功率和扫描速度一定时, 熔覆层高度随送粉速率的增加呈线性增加, 熔覆层宽度略有增加, 重熔层深度和 h/H 值略有减小。

2.5 搭接率

搭接率是指在进行多道熔覆时, 相邻熔覆道次之间的搭接宽度与单道熔覆层宽度之比。当搭接率偏小时, 相邻熔覆道次间会出现明显的凹陷区; 而搭接率

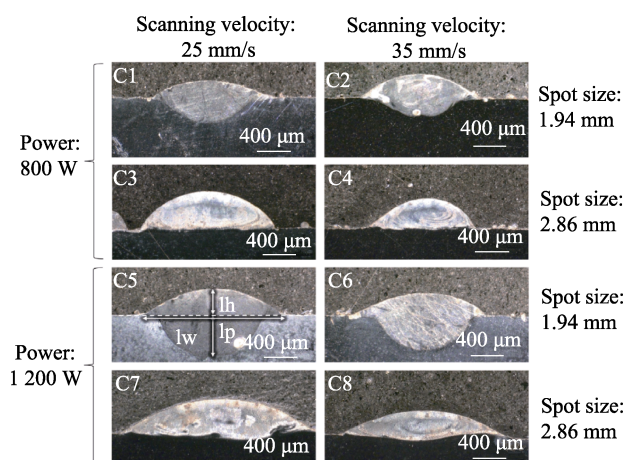


图 5 不同激光功率、扫描速度和光斑尺寸条件下单道熔覆层的截面形貌^[55]

Fig.5 Cross-sectional morphology of single-track cladding coating under different laser power, scanning velocity, and spot size^[55]

偏大时,相邻 2 个熔覆道次的高度不同,且易出现搭接区的凸出。因此,搭接率的大小直接影响了熔覆层的冶金质量和表面平整度^[58-60]。

郭士锐等^[58]采用大功率半导体光纤耦合激光器在灰铸铁 HT250 基材表面制备了多道搭接铁基合金熔覆层,并以稀释率及表面平整度为指标对搭接率进行了优化。研究表明,搭接率过大(55%和 65%)时,在熔覆层搭接处出现了大尺寸的孔洞缺陷;搭接率从 25%逐渐增大至 55%的过程中,熔覆层稀释率先减小后增大,而表面平整度呈现相反的变化趋势。当搭接率为 35%时,稀释率最低为 5.16%,表面平整度最高为 0.88,熔覆质量最优。Lian 等^[59]系统研究了环向连续搭接、环向对称搭接、轴向连续搭接和轴向对称搭接 4 种不同熔覆方式(如图 6 所示)下,搭接率对激光熔覆层平整度和缺陷率的耦合效应,并基于单因素试验建立了搭接率、平整度和缺陷率的数学预测模型。结果表明,在 4 种熔覆方式下,随着搭接率的增大,熔覆层平整度均呈现先增大后减小的变化趋势,而缺陷率先减小后增大。通过灰色关联分析可知,搭接率为 30%的环形连续搭接熔覆为最优方式,可以制备出具有最大表面平整度和最小缺陷率的熔覆层。

2.6 工艺参数优化

值得注意的是,实际激光熔覆过程是多种工艺参数共同作用的结果,参数之间的互相作用使得工艺参数与熔覆层质量之间存在着复杂的非线性关系^[61]。为获得高质量和性能的熔覆层,往往需要进行大量试验

以获得优化的工艺参数^[62-64]。

Reddy 等^[63]对激光熔覆 SHS 7170 铁基合金涂层的工艺参数优化进行了相关研究,结合多组单道熔覆试验的数据,建立了激光功率、激光移动速度和送粉速率 3 种工艺参数对粉末沉积效率、稀释率和孔隙率的影响模型。在 0.4~2 kW 的激光功率、150~1 200 mm/min 的激光移动速度和 4~10 g/min 的送粉速率构成的工艺参数窗口下,随着激光功率的增加和送粉速率的降低,粉末沉积效率和稀释率均逐渐增大;涂层的孔隙率与工艺参数无关,主要取决于熔覆材料。Yu 等^[65]采用田口-灰色关联法对激光熔覆 Fe313 涂层的工艺参数进行了多目标优化。他们利用田口法设计了 25 组正交试验,工艺参数变量为激光功率、扫描速度和送粉速率,选取熔覆层宽度、高度及稀释率作为响应指标。通过对如图 7 所示的等高线图、曲面图和对响应目标的信噪比进行方差分析,可以得到工艺参数对熔覆层几何特征的影响趋势和程度。再结合灰色关联理论,将 3 个响应指标转化为单一的灰色关联度值,对最大熔覆层宽度、最小熔覆层高度和适当的稀释率进行优化。研究基于田口-灰色关联分析,实现了多响应下的多工艺参数优化,确定了最优工艺参数组合,并通过试验验证了灰色关联度的预测和响应目标的改进。

但是,由于激光熔覆急热骤冷的特点,使得熔池存在时间极短,熔覆过程中各工艺参数互相影响较为复杂,仅依靠优化工艺参数来调控涂层的组织和性能,其作用能力具有一定的局限性。

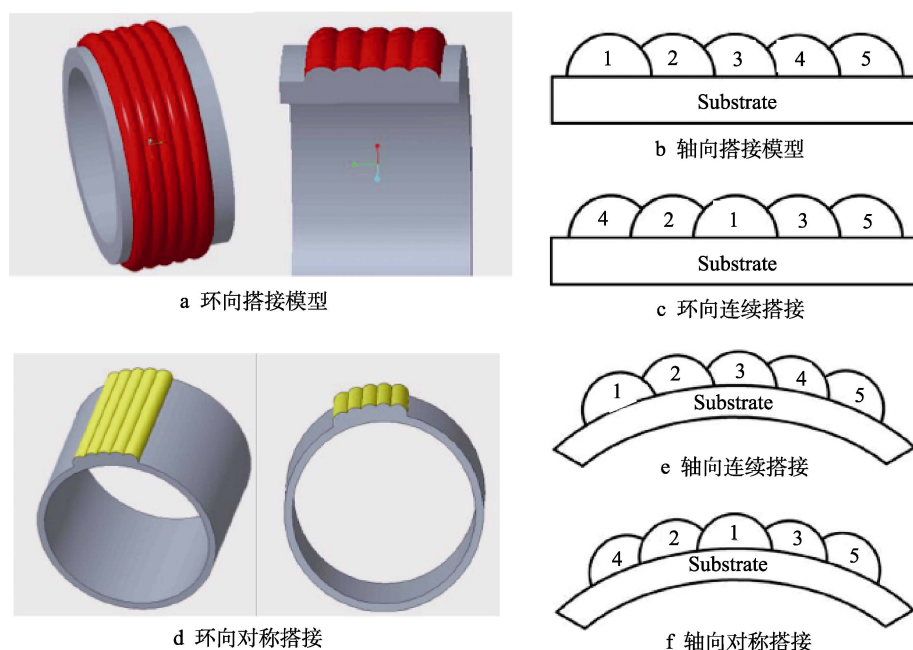


图 6 不同熔覆工艺示意图^[59]

Fig.6 Schematic diagram of the cladding method^[59]: a) circumferential overlapping model; b) circumferential sequential overlapping; c) circumferential symmetrical overlapping; d) axial overlapping model; e) axial sequential overlapping; f) axial symmetrical overlapping

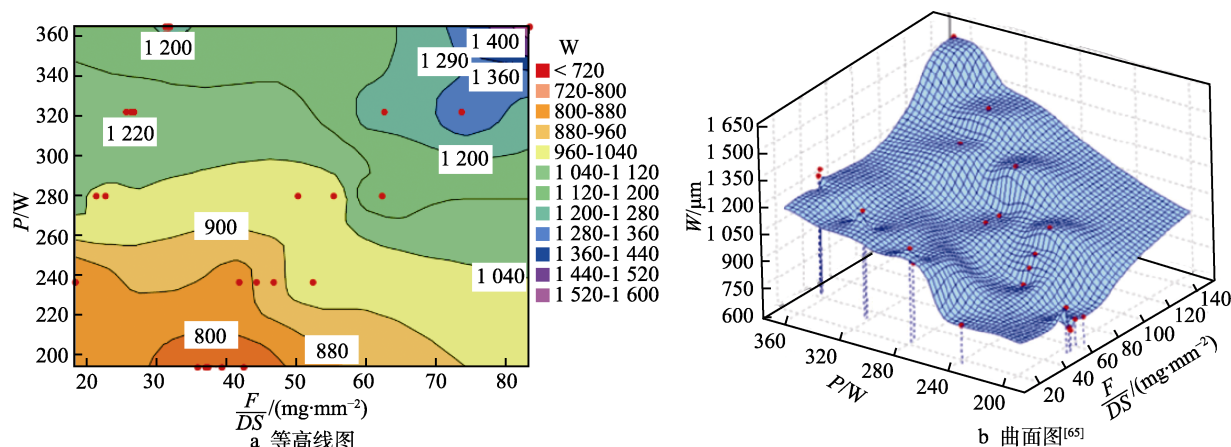


图 7 等高线图 (a) 和曲面图 (b) [65]
Fig.7 Contour plot (a) and surface plot (b) [65]

3 外场辅助技术在激光熔覆铁基涂层中的应用

合理的熔覆材料设计和优化熔覆工艺参数可以在一定程度上降低涂层中的缺陷数量,但是对于高硬铁基涂层,依然很难完全消除其组织中的裂纹等缺陷[66]。

同时,激光熔覆急热快冷的凝固特征易导致熔池内元素扩散不充分,使得熔覆层组织均匀性较差,最终影响其性能[67]。近些年,研究者们将外场辅助技术与激光熔覆技术相结合,通过超声振动场、电磁场、感应加热等能场的施加(如图 8 所示),影响熔体的对流运动,使温度场和溶质分布更加均匀,因而在组织细化、缺陷消除、性能提升等方面发挥了重要作用[68-70]。

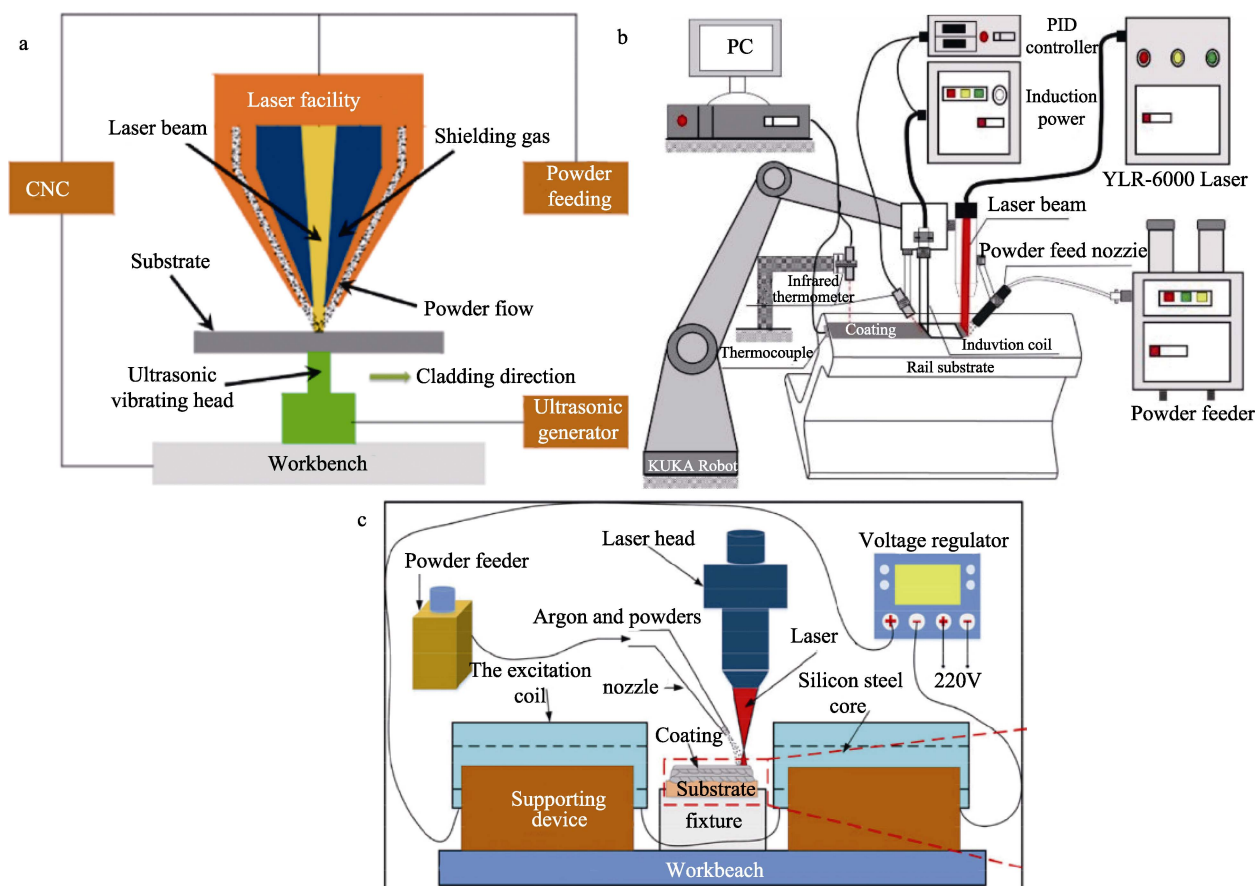


图 8 超声振动辅助激光熔覆示意图 (a) [71]、感应加热辅助激光熔覆示意图 (b) [72]
以及电磁场辅助激光熔覆示意图 (c) [73]

Fig.8 Schematic diagram of ultrasonic vibration assisted laser cladding (a) [71], induction heating assisted laser cladding (b) [72] and electromagnetic field assisted laser cladding (c) [73]

3.1 超声振动辅助激光熔覆

超声振动辅助激光熔覆技术是通过超声波在金属熔体中的空化效应、声流强化效应和热效应影响其凝固过程,进而减少组织中的粗大柱状枝晶,促进等轴晶的生成并细化晶粒,同时降低溶质偏析并促进硬质相的均匀分布^[74-76]。

Zhang 等^[77]采用超声振动辅助激光熔覆技术制备了原位 $\text{TiB}_2\text{-TiC}$ 陶瓷颗粒增强铁基复合涂层,研究了不同超声振动功率(0、100、200、300、400 W)对复合涂层稀释率、形貌、组织特征及抗氧化性能的影响。试验结果表明,超声振动能够通过超声空化效应、流化效应和机械振动效应的综合作用,影响熔池的传质传热过程,进而改善涂层的宏观形貌和微观组织。涂层中陶瓷增强相的含量随着超声振动功率的增加而增多,其分布也更加均匀。采用 300 W 超声振动辅助激光熔覆工艺制备的复合涂层不仅具有良好的耐磨性,而且具有较高的抗氧化性。但是,过大的超声振动功率会增加涂层的开裂倾向。Xiao 等^[71]采用超声振动辅助激光熔覆工艺制备了铁基非晶涂层,研究了超声振动对涂层组织演变的影响。结果表明,超声能量的引入使非晶相与基体间的结晶区平均宽度增加;同时在振动引起的声流作用下,已形成的柱状晶被击碎并重新结晶为等轴晶;但涂层顶部区域组织受超声振动的影响较小,仍为非晶态,因此整个涂层组织呈现 4 层梯度结构。这种梯度组织结构能够降低涂层中的残余应力,从而抑制裂纹的萌生。Zhuang 等^[78]研究了不同振幅下的超声振动辅助对激光熔覆 316L 不锈钢涂层和性能的影响。研究表明,超声振动能够有效改善涂层的宏观成形质量并使组织均匀细化,同时还可促进组织由柱状晶向等轴晶转变。振幅为 17.5 μm 时,316L 不锈钢涂层具有最佳的耐磨性和耐蚀性。同时作者还详细分析了初生柱状晶在超声振动作用下的组织演变过程,如图 9 所示,组织中

分初生柱状晶经历了晶格畸变→位错增殖→亚结构转动→小角度晶界形成→取向累积→新等轴晶粒形成的过程。

3.2 电磁场辅助激光熔覆

电磁场辅助激光熔覆技术是通过电磁场与金属熔体发生互相作用产生的电磁力,改变熔体的对流运动和传热传质过程,进而影响其凝固过程^[79]。电磁场辅助形式有单一磁场(包括稳态磁场、交变磁场、旋转磁场等)、单一电场(包括直流电场、交变电场、脉冲电场等)和电磁复合场 3 类,组合形式多样,可以实现熔覆层凝固组织的调控^[80-82]。

Huang 等^[73]利用如图 8c 所示的电磁场辅助激光熔覆装置在 Cr12MoV 表面制备了多层 Fe901 涂层。研究发现,在施加电磁场后,涂层中的缺陷数量减少。电磁场对熔池的搅拌作用能够打碎柱状枝晶,并促进细枝晶和等轴晶的形成,同时还可以使温度场分布更加均匀。从摩擦磨损试验结果可以看出,电磁场辅助制备的 Fe901 涂层具有更好的耐磨性能。Ouyang 等^[80]将静电场应用于 316L 不锈钢涂层的激光熔覆过程中,通过对比无静电场(NESF)、静电场与激光扫描方向同向(AESF)、静电场与激光扫描方向反向(RESF)条件下涂层的显微组织、晶体取向和力学性能,揭示了静电场对涂层凝固行为和晶体生长的影响机理。如图 10 所示,在无静电场激光熔覆下,较高的凝固速率和对流导致晶粒逐步粗化,晶粒倾向于沿激光扫描方向平行生长;施加与激光扫描方向相反的静电场能够促进熔池中元素的扩散和对流,有利于激光熔覆层的定向凝固并产生柱状晶粒;施加与激光扫描方向一致的静电场能够抑制元素在熔池中的扩散和对流,使得熔覆层整体呈有序的糊状凝固和超细晶粒组织,同时还可促进细小 MC 碳化物的微偏析和析出。

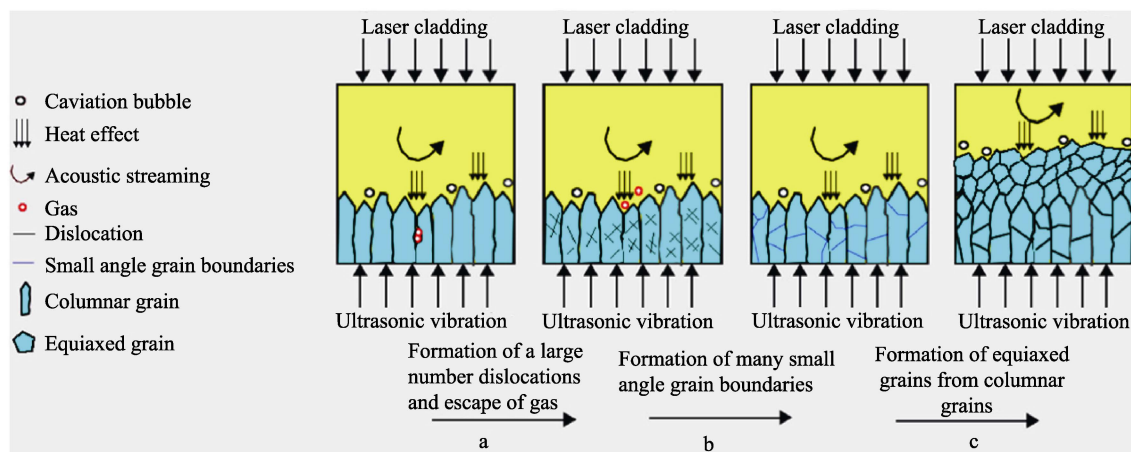


图9 超声辅助激光熔覆 316L 不锈钢中部分初级柱状晶粒组织演变示意图^[78]

Fig.9 Schematic diagram of microstructure evolution in some primary columnar grains of ultrasonic-assisted laser cladding 316L stainless steel^[78]

为了研究磁场对 45 钢表面激光熔覆 Fe60 合金粉末过程中元素分布和凝固特征的影响, Li 等^[83]建立了包括化学物质传输、磁场、流体流动、流体传热和动态网络在内的三维磁场辅助激光熔覆数值模型。研究表明, 在考虑熔覆层几何形状和元素分布的条件下, 数值计算结果与试验数据基本一致。如图 11 中的模拟结果所示, 随着磁场强度从 0.5 T 增大至 1.2 T, 凝固界面处的最大冷却速率逐渐增大, 进而导致晶粒尺寸减小, 通过观察熔覆层的微观组织也证实了这一

结论。因此, 模型可以根据熔池凝固过程中的冷却速率和熔覆层的形态参数预测晶粒尺寸和形貌的变化趋势。该研究为预测磁场辅助激光熔覆过程中的凝固行为和微观组织特征提供了一种有效的方法。

需要指出的是, 电磁场调控熔体凝固组织的窗口期较窄, 而且快速凝固的微小熔池又存在强烈的对流现象, 因此想要定性定量分析电磁力与熔体相互作用、掌握熔体在凝固过程中的组织和性能演变规律、探索熔覆层残余应力变化机制等都是比较困难的。现

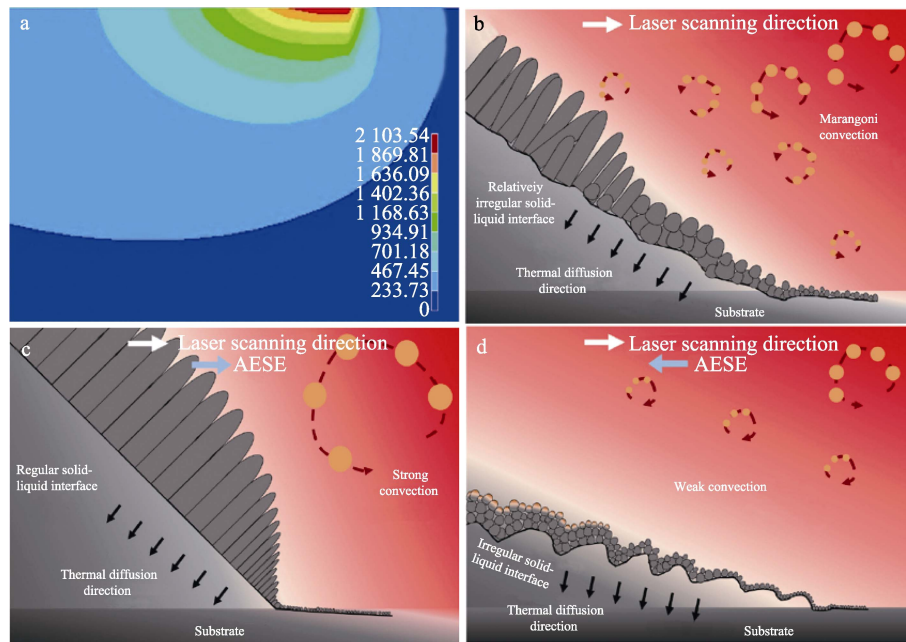


图 10 激光熔覆 316L 不锈钢粉末的模拟温度分布示意图 (a) 以及不同制备状态下激光熔覆层中晶体生长和对流运动示意图 (b~d)^[80]

Fig.10 Schematic diagram for simulated temperature distribution of the laser cladding 316L stainless steel powders (a) and schematic diagram showing the crystal growth and convection in the laser cladding layer with different fabrication states (b-d)^[80]

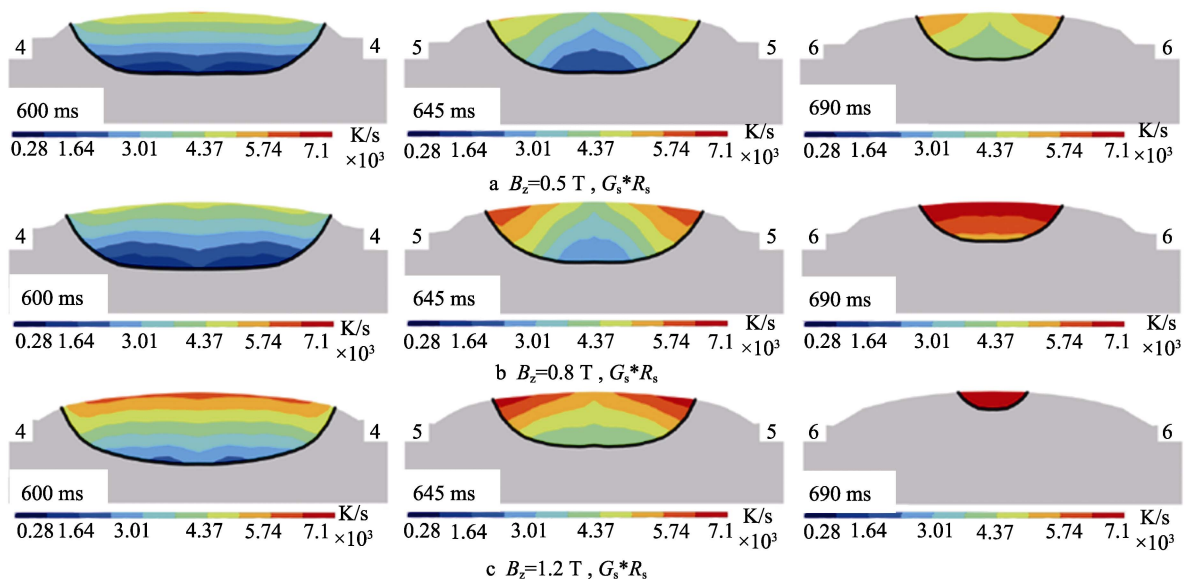


图 11 不同磁场强度下熔覆层横截面的冷却速率分布^[83]

Fig.11 Cross-section cooling rates of cladding layer at different magnetic fields^[83]

阶段, 关于电磁场辅助激光熔覆技术尚处于起步阶段, 相关试验和理论研究相对较少, 后续还需围绕上述问题开展深入研究。

3.3 温度场辅助激光熔覆

3.3.1 感应加热辅助激光熔覆

感应加热辅助激光熔覆是在激光熔覆过程中利用感应热源对基体材料进行同步预热或后热, 以实现降低涂层开裂倾向、提高沉积效率等目的^[84-85]。

Zhu 等^[85]创新性地提出了一种原位感应加热辅助激光熔覆技术 (Laser Cladding Assisted With In-situ Induction Heating, LC-IH), 并将其应用于贝氏体翼轨表面 18Ni300 高性能马氏体时效钢涂层的制备。通过对比传统激光熔覆工艺和激光熔覆-原位感应加热工艺, 在进行多道沉积的热循环过程中, 发现后道制备时的热量输入能够对已沉积涂层起到原位时效热处理 (In-situ Aging Heating Treatment, IAHT) 作用, 且激光熔覆-原位感应加热工艺对应的累积 IAHT 时间远大于传统激光熔覆工艺, 更有利于组织中纳米沉淀相的析出。与未处理的钢轨相比, 通过激光熔覆-原位感应加热处理的钢轨, 其弯曲强度和冲击韧性分别提高了 4.2% 和 20.0%, 同时耐磨性也得到改善。LC-IH 技术无需在炉内进行本体热处理, 即可原位制备高性能涂层, 因此具有工业应用前景。

3.3.2 基体预热处理

预热处理是在激光熔覆前对基体进行加热的一种工艺, 能够降低熔覆层的冷却速度, 从而缓解激光熔覆层的裂纹问题^[86-87]。例如, Wang 等^[88]采用激光熔覆方法在 H13 钢表面制备了 $\text{Fe}_{47}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{Co}_3\text{C}_{15}\text{B}_6$ 铁基非晶涂层, 通过设计不同的预热温度, 系统研究了涂层内部裂纹的演变趋势, 从而建立了预热参数与组织和性能之间的关系, 为制备高性能无裂纹非晶涂

层提供了理论依据。结果表明, 不同的预热温度对熔覆层的成形质量和内部元素分布有显著影响。如图 12 所示, 预热温度过低或过高均无法消除熔覆层中的裂纹, 当预热温度为 250 °C 时, 可以获得无裂纹的熔覆层, 其综合性能最好。同时, 随着预热温度的升高, 熔覆层中元素分布趋于均匀。

3.3.3 激光重熔处理

激光重熔 (Laser Remelting, LR) 技术是指在不额外添加材料的情况下, 通过激光束的辐照使材料表面迅速熔化和凝固的过程^[89]。近些年, 研究者们将激光重熔应用于激光熔覆层或激光增材制造材料的后处理中, 以实现提高熔覆层密度、降低缺陷、消除残余应力并使组织成分均匀化的目的^[90]。

Yao 等^[91]将激光重熔应用于 AerMet100 钢的激光熔覆过程中, 研究了激光重熔对组织演变及力学性能的影响, 并揭示了激光熔覆和激光重熔对 AerMet100 钢的强化增韧机理。如图 13 所示, 施加激光重熔可以有效抑制激光熔覆沉积多层 AerMet100 钢中柱状晶的外延生长, 进而缓解其力学性能的各向异性。激光重熔能够将熔覆层中的柱状晶尖端熔化成碎片, 并使棒状碳化物不完全溶解成尺寸更小的粒状碳化物。这些碎片既可以阻断柱状晶凝固前沿以抑制其生长, 也可在熔池底部形核并生长为等轴晶; 同时未溶解的粒状碳化物也可在熔池中充当非均匀形核中心, 促进等轴晶的形成。激光重熔能够提供与激光增材制造相似的热环境, 因此相关研究结果可以为 AerMet100 钢作为潜在激光增材制造原材料提供一定的试验基础。Xi 等^[92]研究了激光重熔功率和重熔次数对 YCF102 铁基熔覆层形态特征和力学性能的影响。结果表明, 随着重熔次数或重熔功率的增加, 熔覆层的宽度、熔池深度和稀释率增大, 熔覆层高度降低。与未处理的熔覆层相比, 激光功率为 650 W、重熔 1 次

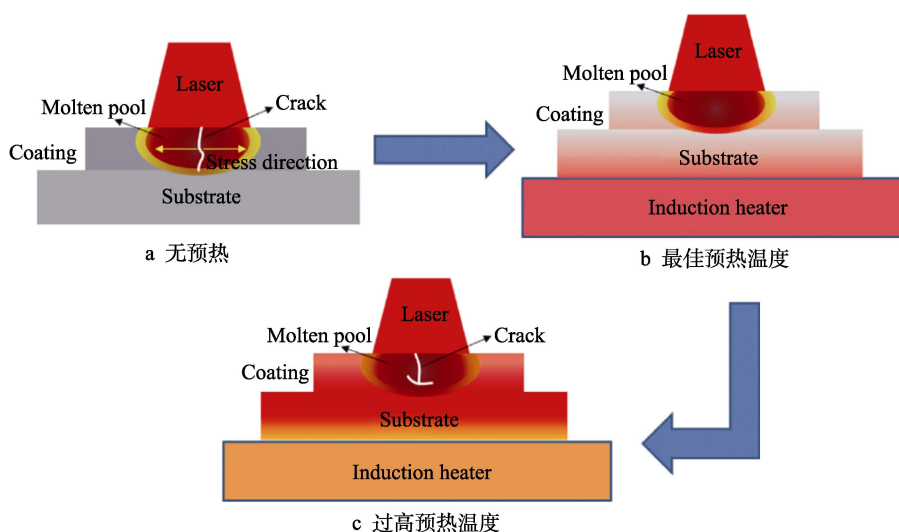


图 12 基体预热对熔覆层裂纹情况影响示意图^[88]

Fig.12 Schematic diagram of effect of substrate preheating on cladding layer: a) non-preheating; b) optimum preheating temperature; c) high preheating temperature^[88]

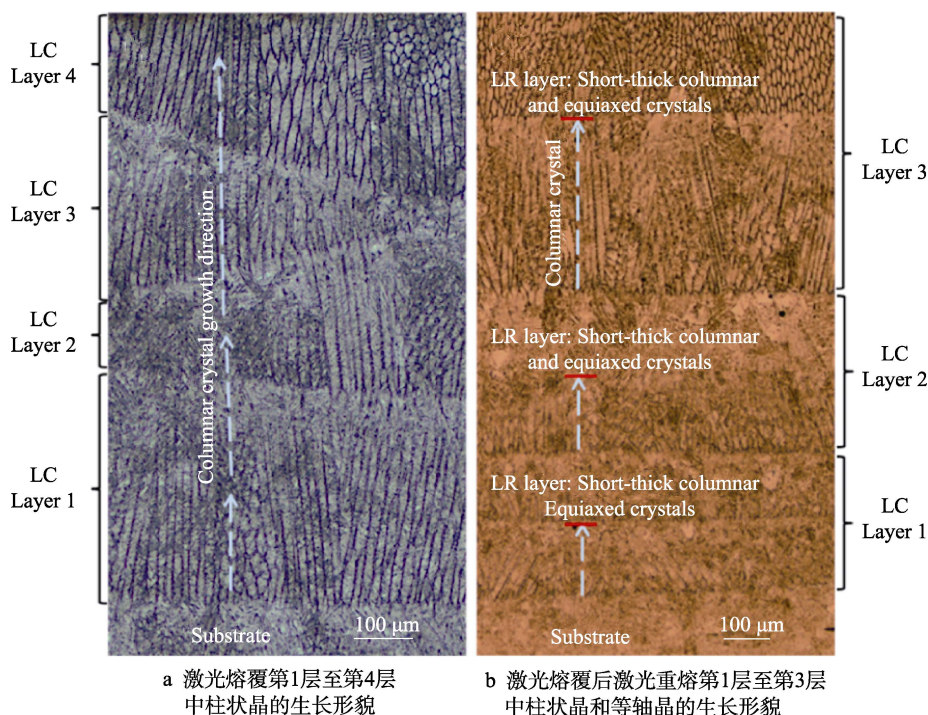


图 13 激光熔覆和激光熔覆后激光重熔制备的 AerMet100 钢的截面光镜形貌 (X-Z 平面) ^[91]

Fig.13 OM images of the cross-section (X-Z plane) of AerMet100 steel specimen deposited by LC, and by LC plus LR: a) growth morphology of columnar crystals from layer 1 to layer 4 deposited by LC; b) growth morphology of columnar and equiaxed crystals from layer 1 to layer 3 deposited by LC plus LR-2^[91]

的熔覆层具有较高的硬度和良好的耐磨性; 进一步提高激光功率或增加重熔次数均会导致硬度降低和耐磨性能下降, 这是因为热量不断累积导致熔覆层的晶粒粗大化。

3.3.4 热处理工艺

热处理是一种传统材料处理工艺, 它是在一定介质中以不同方式对材料进行加热、保温和冷却, 通过改变材料的微观组织, 以获得所需的性能。通过后续热处理可以解决激光熔覆层的成分偏析和残余应力过大等问题, 对改善其微观组织和力学性能有积极作用^[93-94]。

Zhao 等^[95]研究了固溶时效处理对激光熔覆 Fe-0.5C-11Cr 合金涂层组织和性能的影响。结果表明, 固溶时效处理可以有效改善 Fe-0.5C-11Cr 熔覆层中树枝状碳化物的形貌、尺寸和数量。热处理后, 块状、长棒状、连续晶界碳化物转变为圆形、不连续的短棒状碳化物, 大大提高了组织的均匀性。同时, 熔覆层的显微硬度和耐蚀性也显著提高。他们还发现在 1 050 °C 的固溶温度下, 组织中碳化物的熔化和生长存在一个动态平衡和临界时间, 根据试验结果可以得到固溶处理的临界时间为 20 min。

4 展望

通过上述总结可以看出, 现阶段国内外研究者们围绕激光熔覆铁基合金涂层的材料设计、工艺参数优

化、外场辅助技术应用等方面已取得了积极进展。未来可以考虑针对以下关键问题继续深入开展相关研究工作:

1) 继续完善建立适用于激光熔覆的铁基合金材料体系, 重点关注具有较强应用型的通用合金以及非晶合金、高熵合金等新型熔覆材料的成分设计与应用。此外, 现阶段使用的熔覆原材料主要以粉体材料为主, 未来应多关注丝材和丝粉协同方式在激光熔覆铁基涂层中的应用。

2) 探索新型涂层结构设计, 可以将梯度功能材料 (Functional Gradient Materials, FGMs) 设计理念应用于激光熔覆铁基涂层, 通过调控涂层的成分、组织、结构等沿特定方向呈现连续梯度变化, 以实现梯度功能涂层的制备。

3) 目前工艺参数优化采用的评价指标主要集中在熔覆层的几何尺寸、稀释率、缺陷数量等, 而缺少对涂层残余应力、力学性能、腐蚀性能等各类性能的系统性评价。未来应进一步完善激光熔覆铁基合金涂层的工艺参数优化评价指标系统, 结合各类优化方法和数值模拟技术, 建立包含工艺参数、熔覆层成形质量和各类性能等因素的相关理论模型, 实现对熔覆过程及结果的可预测性及可控性。

4) 拓展外场辅助激光熔覆、超高速激光熔覆、选择性激光熔化 (Selected Laser Melting, SLM) 等新型激光熔覆技术及装备在铁基涂层制备及性能提

升中的应用。例如,现阶段研究大多集中于单一外场辅助下的激光熔覆,后续可以关注复合场耦合作用对铁基涂层组织调控的影响机制。

参考文献:

- [1] AHMAD SIDDIQUI A, DUBEY A K. Recent Trends in Laser Cladding and Surface Alloying[J]. Optics Laser Technology, 2021, 134: 106619.
- [2] ZHU L D, XUE P S, LAN Q, et al. Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A Review[J]. Optics Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [3] WANG Q, LI Q, ZHANG L, et al. Microstructure and Properties of Ni-WC Gradient Composite Coating Prepared by Laser Cladding[J]. Ceramics International, 2022, 48(6): 7905-7917.
- [4] SHI S H, XU A Q, FAN J W, et al. Study of Cobalt-Free, Fe-Based Alloy Powder Used for Sealing Surfaces of Nuclear Valves by Laser Cladding[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 245: 8-12.
- [5] 冯育磊, 张训国, 叶晋, 等. 大型风电轴承滚道表面激光熔覆马氏体不锈钢涂层显微组织及性能研究[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202006.
FENG Y L, ZHANG X G, YE J, et al. Microstructure and Properties of Laser Cladding Martensitic Stainless Steel Coating on Large Wind-Power Bearing Raceway Surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202006.
- [6] YANG J X, MA W Y, ZHANG W T, et al. The Dynamic Load-Bearing Performance of the Laser Cladding Fe-Based Alloy on the U75V Rail[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 165: 107180.
- [7] DING H H, MU X P, ZHU Y, et al. Effect of Laser Claddings of Fe-Based Alloy Powder with Different Concentrations of WS₂ on the Mechanical and Tribological Properties of Railway Wheel[J]. Wear, 2022, 488/489: 204174.
- [8] LI Q, ZHANG Y L, ZHANG L, et al. Effect of Boron on the Microstructural Evolution and Wear Resistance of High-Hardness Fe-Based Alloy Coatings Prepared by Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 458: 129342.
- [9] 张帆. 激光熔覆纳米 WC 颗粒增强铁基复合涂层的研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2022.
ZHANG F. Research on Laser Cladding Nano-WC Particles Reinforced Iron-Based Composite Coating[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2022.
- [10] 冯凯, 郭彦兵, 冯育磊, 等. 激光熔覆高强韧铁基涂层精细组织调控与性能研究[J]. 金属学报, 2022, 58(4): 513-528.
FENG K, GUO Y B, FENG Y L, et al. Microstructure Controlling and Properties of Laser Cladded High Strength and High Toughness Fe-Based Coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(4): 513-528.
- [11] 陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502001.
CHEN J F, LI X P, XUE Y P. Friction and Wear Properties of Laser Cladding Fe901 Alloy Coating on 45 Steel Surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502001.
- [12] WANG Q, CHEN F Q, ZHANG L, et al. Microstructure Evolution and High Temperature Corrosion Behavior of FeCrBSi Coatings Prepared by Laser Cladding[J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 17233-17242.
- [13] 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.
- [14] LI K B, LI D, LIU D Y, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Multiple-Layer Laser Cladding Coating of 308L Stainless Steel[J]. Applied Surface Science, 2015, 340: 143-150.
- [15] MAHMOUD E R I, KHAN S Z, EJAZ M. Laser Surface Cladding of Mild Steel with 316L Stainless Steel for Anti-Corrosion Applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 39: 1029-1033.
- [16] 朱红梅, 胡际鹏, 李柏春, 等. 铁基材料表面激光熔覆不锈钢涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 74-84.
ZHU H M, HU J P, LI B C, et al. Research Progress of Laser Cladding Stainless Steel Coating on Fe-Based Substrate[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 74-84.
- [17] 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): 1114001.
SUN Y S, HAN Y, ZHANG Y, et al. Microstructure of 304 Stainless Steel Fabricated by Laser Cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1114001.
- [18] HE B, ZHANG L J, ZHU Q H, et al. Effect of Solution Treated 316L Layer Fabricated by Laser Cladding on Wear and Corrosive Wear Resistance[J]. Optics Laser Technology, 2020, 121: 105788.
- [19] GUO W M, LI X Q, DING N, et al. Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of a Laser Cladded Fe-Based Martensitic Stainless Steel Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 408: 126795.
- [20] ALAM M K, MEHDI M, URBANIC R J, et al. Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Analysis of Laser-Cladded AISI 420 Martensitic Stainless Steel[J]. Materials Characterization, 2020, 161: 110138.
- [21] LI R, FERREIRA M G S, ANJOS M, et al. Localized Corrosion Performance of Laser Surface Cladded UNS S44700 Superferritic Stainless Steel on Mild Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 88(1): 96-102.
- [22] 计东生. 激光熔覆含 Nb 双相不锈钢涂层的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2021.

- JI D S. Research of Nb-Containing Duplex Stainless Steel Coatings by Laser Cladding[D]. Hengyang: University of South China, 2021.
- [23] LIU E J, HUANG F F, BAO F H, et al. Microstructure and Electrochemical Corrosion Behaviors of Laser-Cladded 2205 Duplex Stainless Steel[J]. *Steel Research International*, 2020, 91(6): 1900456.
- [24] BOTTA W J, BERGER J E, KIMINAMI C S, et al. Corrosion Resistance of Fe-Based Amorphous Alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 586: S105-S110.
- [25] LI K Y, LIANG J, ZHOU J S. Preparation and Characterization of Laser Cladded FeCrMoBSi Amorphous Composite Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 423: 127520.
- [26] 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.
- [27] ZHU H M, OUYANG M N, HU J P, et al. Design and Development of TiC-Reinforced 410 Martensitic Stainless Steel Coatings Fabricated by Laser Cladding[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(9): 12505-12513.
- [28] XIAO Q, SUN W L, YANG K X, et al. Wear Mechanisms and Micro-Evaluation on WC Particles Investigation of WC-Fe Composite Coatings Fabricated by Laser Cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 420: 127341.
- [29] FENG Y L, PANG X T, FENG K, et al. Residual Stress Distribution and Wear Behavior in Multi-Pass Laser Cladded Fe-Based Coating Reinforced by $M_3(C, B)$ [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 5597-5607.
- [30] CHEN L Y, YU T B, XU P F, et al. In-Situ NbC Reinforced Fe-Based Coating by Laser Cladding: Simulation and Experiment[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 412: 127027.
- [31] PENG Z L, ZHANG J, ZHANG M J, et al. Laser In-Situ Preparation and Mechanical Properties of VC Reinforced Fe-Based Wear-Resistant Composite Cladding[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(19): 28240-28249.
- [32] 周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆 $Al_2O_3/Fe901$ 复合涂层的强化机制及耐磨性[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0514001.
- ZHOU J Z, HE W Y, XU J L, et al. Strengthening Mechanism and Wear Resistance of $Al_2O_3/Fe901$ Composite Coating Prepared by Laser Cladding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0514001.
- [33] ZHU Z C, LI J F, PENG Y X, et al. In-Situ Synthesized Novel Eyeball-Like Al_2O_3/TiC Composite Ceramics Reinforced Fe-Based Alloy Coating Produced by Laser Cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 391: 125671.
- [34] LI J F, ZHU Z C, PENG Y X, et al. Phase Evolution and Wear Resistance of In-Situ Synthesized $(Cr, W)_{23}C_6$ -WC Composite Ceramics Reinforced Fe-Based Composite Coatings Produced by Laser Cladding[J]. *Vacuum*, 2021, 190: 110242.
- [35] LU J Z, CAO J, LU H F, et al. Wear Properties and Microstructural Analyses of Fe-Based Coatings with Various WC Contents on H13 Die Steel by Laser Cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 369: 228-237.
- [36] 陈海瑞. 陶瓷颗粒增强钢基复合材料激光熔覆增材组织性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- CHEN H R. Research on Microstructure and Properties of Ceramic Particles Reinforced Steel-Based Composites by Laser Cladding Additive Manufacturing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [37] CHEN L Y, YU T B, GUAN C, et al. Microstructure and Properties of Metal Parts Remanufactured by Laser Cladding TiC and TiB_2 Reinforced Fe-Based Coatings[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(10): 14127-14140.
- [38] WANG Q, YANG J, NIU W J, et al. Effect of La_2O_3 on Microstructure and Properties of Fe-Based Alloy Coatings by Laser Cladding[J]. *Optik*, 2021, 245: 167653.
- [39] LI J F, ZHU Z C, PENG Y X, et al. A Comparative Study on Microstructure Evolution and Wear Resistance of Different-Sized Tungsten Carbide Modified Fe-Based Laser Cladding Coatings[J]. *Optics Laser Technology*, 2022, 147: 107672.
- [40] REN Y Q, LI L Q, ZHOU Y D, et al. In Situ Synthesized VC Reinforced Fe-Based Coating by Using Extreme High-Speed Laser Cladding[J]. *Materials Letters*, 2022, 315: 131962.
- [41] LI Q T, LEI Y P, FU H G. Laser Cladding In-Situ NbC Particle Reinforced Fe-Based Composite Coatings with Rare Earth Oxide Addition[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 239: 102-107.
- [42] ZHANG H, ZOU Y, ZOU Z D, et al. Microstructure and Properties of Fe-Based Composite Coating by Laser Cladding Fe-Ti-V-Cr-C- CeO_2 Powder[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 65: 119-125.
- [43] ZHANG M Y, LI M, WANG S F, et al. Enhanced Wear Resistance and New Insight into Microstructure Evolution of In-Situ (Ti, Nb)C Reinforced 316 L Stainless Steel Matrix Prepared via Laser Cladding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106043.
- [44] 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.
- [45] 王强, 杨驹, 牛文娟, 等. La_2O_3 对激光熔覆铁基 JG-8 合金组织与性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(6): 2125-2133.
- WANG Q, YANG J, NIU W J, et al. Effect of La_2O_3 on the Microstructure and Properties of Laser Cladding Fe-Based JG-8 Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(6): 2125-2133.

- [46] 林冉, 舒林森, 董月, 等. 激光功率和扫描速度对熔覆组织与性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914004.
LIN R, SHU L S, DONG Y, et al. Effect of Laser Power and Scanning Speed on Microstructure and Properties of Cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1914004.
- [47] DO VALE N L, FERNANDES C A, DE A SANTOS R, et al. Effect of Laser Parameters on the Characteristics of a Laser Clad AISI 431 Stainless Steel Coating on Carbon Steel Substrate[J]. JOM, 2021, 73(10): 2868-2877.
- [48] YI P, ZHAN X H, HE Q K, et al. Influence of Laser Parameters on Graphite Morphology in the Bonding Zone and Process Optimization in Gray Cast Iron Laser Cladding[J]. Optics Laser Technology, 2019, 109: 480-487.
- [49] 马清, 张艳梅, 卢冰文, 等. 激光功率对激光熔覆 FeCoNiCr 高熵合金涂层组织结构及腐蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2022, 35(1): 116-124.
MA Q, ZHANG Y M, LU B W, et al. Effects of Laser Power on Microstructure and Corrosion Property of Laser Cladding FeCoNiCr High Entropy Alloy Coatings[J]. China Surface Engineering, 2022, 35(1): 116-124.
- [50] NIE M H, ZHANG S, WANG Z Y, et al. Effect of Laser Power on Microstructure and Interfacial Bonding Strength of Laser Cladding 17-4PH Stainless Steel Coatings[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 275: 125236.
- [51] 李天澍, 邓德伟, 李振华, 等. 激光功率对 Fe-TiC 复合涂层组织及硬度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 3788.
LI T S, DENG D W, LI Z H, et al. Effect of Laser Power on Microstructure and Hardness of Fe-TiC Composite Coatings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 3788.
- [52] HEMMATI I, OCELÍK V, DE HOSSON J T M. The Effect of Cladding Speed on Phase Constitution and Properties of AISI 431 Stainless Steel Laser Deposited Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(21/22): 5235-5239.
- [53] WANG H Z, CHENG Y H, SONG W, et al. Research on the Influence of Laser Scanning Speed on Fe-Based Amorphous Coating Organization and Performance[J]. Intermetallics, 2021, 136: 107266.
- [54] 王强, 杨驹, 牛文娟, 等. 高速激光熔覆铁基 TY-2 合金组织及力学性能分析[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 66-73.
WANG Q, YANG J, NIU W J, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Fe-Based TY-2 Alloy Coatings by High-Speed Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 66-73.
- [55] GARCIA-HERRERA J E, HENAO J, ESPINOSA-ARBELAEZ D G, et al. Laser Cladding Deposition of a Fe-Based Metallic Glass on 304 Stainless Steel Substrates[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(4): 968-979.
- [56] 王永霞, 丁国华, 梁莉蒙. 送粉速率对铁基合金激光熔覆层组织形貌的影响[J]. 应用激光, 2022, 42(12): 38-44.
WANG Y X, DING G H, LIANG L M. Effect of Powder Feeding Rate on Microstructure Morphology of Laser Cladding Layer of Fe-Based Alloy[J]. Applied Laser, 2022, 42(12): 38-44.
- [57] CUI W H, WANG H, SHAO D Q, et al. Analysis of Influencing Factors and Experimental Study on Properties of Laser Cladding Layer[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 631(3): 032016.
- [58] 郭士锐, 赵阳, 崔陆军, 等. 基于灰铸铁表面多道搭接熔覆成形质量及组织性能研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(4): 31-35.
GUO S R, ZHAO Y, CUI L J, et al. Study on Forming Quality, Microstructure and Properties of Multi-Lap Cladding on the Surface of Gray Cast Iron[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(4): 31-35.
- [59] LIAN G F, YUE K, LIU Z Z, et al. Influences of the Cladding Method and Overlapping Rate on the Multi-Channel Overlapping of Composite Coatings[J]. Optik, 2023, 283: 170896.
- [60] 张若宾, 张瑞乾. 激光熔覆铁基合金的单层多道搭接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(22): 158-161.
ZHANG R B, ZHANG R Q. Study on Single-Layer Multi-Channel Overlapping Process of Laser Cladding Iron-Based Alloy[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(22): 158-161.
- [61] 巩江涛, 舒林森, 王家胜, 等. 激光熔覆工艺优化方法研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 3788.
GONG J T, SHU L S, WANG J S, et al. Research Status and Development Trend of Laser Cladding Process Optimization Method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 3788.
- [62] DENG D W, LI T S, HUANG Z Y, et al. Multi-Response Optimization of Laser Cladding for TiC Particle Reinforced Fe Matrix Composite Based on Taguchi Method and Grey Relational Analysis[J]. Optics Laser Technology, 2022, 153: 108259.
- [63] REDDY L, PRESTON S P, SHIPWAY P H, et al. Process Parameter Optimisation of Laser Clad Iron Based Alloy: Predictive Models of Deposition Efficiency, Porosity and Dilution[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 198-207.
- [64] 舒林森, 林冉. 基于均匀设计的铁基合金粉末激光熔覆工艺参数优化[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(4): 167-174.
SHU L S, LIN R. Optimization of Laser Cladding Process Parameters of Iron-Based Alloy Powder Based on Uniform Design[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(4): 167-174.
- [65] YU T B, YANG L, ZHAO Y, et al. Experimental Research and Multi-Response Multi-Parameter Optimization of Laser Cladding Fe313[J]. Optics Laser Technology, 2018,

- 108: 321-332.
- [66] LI K Q, LI T, MA M, et al. Laser Cladding State Recognition and Crack Defect Diagnosis by Acoustic Emission Signal and Neural Network[J]. Optics Laser Technology, 2021, 142: 107161.
- [67] LI G S, WANG Z Y, YAO L G, et al. Component Mixing in Laser Cladding Processes: From Single-Track to Single-Layer Multi-Track and Multi-Layer Multi-Track[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 455: 129233.
- [68] MENG L, ZHU B B, HU Q W, et al. Laser-Induction Hybrid Cladding of Different Coatings on Rail Surface: Microstructure, Wear Properties and Contact Fatigue Behaviors[J]. Applied Surface Science, 2021, 566: 150678.
- [69] WANG Q, CHEN F Q, LI Q, et al. Microstructure and Properties of Ni60 Alloy Coating Prepared by Electromagnetic Compound Field Assisted Laser Cladding[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 291: 126678.
- [70] ZHANG T, ZHOU J Z, WANG J Z, et al. Effect of Hybrid Ultrasonic-Electromagnetic Field on Cracks and Microstructure of Inconel 718/60%WC Composites Coating Fabricated by Laser Cladding[J]. Ceramics International, 2022, 48(22): 33901-33913.
- [71] XIAO M Y, JIANG F C. Microstructural Evolution of Fe-Based Amorphous Alloy Coatings via Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Cladding[J]. Materials Letters, 2022, 322: 132520.
- [72] 孟丽. 钢轨表面激光-感应复合熔覆技术基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- MENG L. Fundamental Studies of Laser-Induction Hybrid Cladding Technique on Full-Scale Rail Surface[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [73] HUANG L, ZHOU J Z, XU J L, et al. Microstructure and Wear Resistance of Electromagnetic Field Assisted Multi-Layer Laser Clad Fe901 Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 395: 125876.
- [74] SONG H L, JIANG F C, GUO C H, et al. Effect of Ultrasonic Vibration on the Microstructure and Microhardness of Laser Cladding Fe-Based Crystalline/Amorphous Composite Coatings[J]. Materials Letters, 2023, 335: 133780.
- [75] 陈健, 姚喆赫, 姚建华, 等. 超声振动辅助激光熔覆技术研究进展综述[J]. 航空制造技术, 2021, 64(12): 36-46.
- CHEN J, YAO Z H, YAO J H, et al. State-of-Art Review on Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Cladding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(12): 36-46.
- [76] LI C, YANG Y P, LIU Z T, et al. Differential Analysis of the Influence Mechanism of Ultrasonic Vibrations on Laser Cladding[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2022, 38: 16-37.
- [77] ZHANG M, ZHAO G L, WANG X H, et al. Microstructure Evolution and Properties of In-Situ Ceramic Particles Reinforced Fe-Based Composite Coating Produced by Ultrasonic Vibration Assisted Laser Cladding Processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 403: 126445.
- [78] ZHUANG D D, DU B, ZHANG S H, et al. Effect and Action Mechanism of Ultrasonic Assistance on Microstructure and Mechanical Performance of Laser Cladding 316L Stainless Steel Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 433: 128122.
- [79] 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.
- [80] OUYANG W T, XU Z F, CHAO Y, et al. Effect of Electrostatic Field on Microstructure and Mechanical Properties of the 316L Stainless Steel Modified Layer Fabricated by Laser Cladding[J]. Materials Characterization, 2022, 191: 112123.
- [81] WANG Q, ZHAI L L, ZHANG L, et al. Effect of Steady Magnetic Field on Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni-Based Alloy Coating[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 17: 2145-2157.
- [82] 翟璐璐. 交变电流与稳态磁场作用下激光熔覆镍基金涂层组织与性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- ZHAI L L. Study on Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni-Based Alloy Coatings under the Alternating Current and Steady Magnetic Field[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [83] LI G S, WANG Z Y, YAO L G, et al. Concentration Mixing and Melt Pool Solidification Behavior during the Magnetic Field Assisted Laser Cladding of Fe-Cr-Based Alloy on 45 Steel Surface[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 445: 128732.
- [84] ZHOU S F, DAI X Q, ZHENG H Z. Microstructure and Wear Resistance of Fe-Based WC Coating by Multi-Track Overlapping Laser Induction Hybrid Rapid Cladding[J]. Optics Laser Technology, 2012, 44(1): 190-197.
- [85] ZHU B B, MENG L, ZENG X Y, et al. Laser Cladding High-Performance Maraging-Steel Coatings on Bainitic Cross Wing Rails Assisted with In-Situ Induction Heating: Microstructure and Performance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 313: 117886.
- [86] FENG Y L, PANG X T, FENG K, et al. A Method for Evaluating the Crack Resistance and Predicting the Preheating Temperature of High Hardness Coating Prepared by Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 432: 128076.

(下转第 66 页)