

铁基材料表面激光熔覆不锈钢涂层的研究进展

朱红梅, 胡际鹏, 李柏春, 李勇作, 邱长军

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 激光熔覆技术作为推动国家制造业升级的重要绿色制造和再制造技术, 在航空航天、海工交通、冶金机械等重点领域具有广阔的应用前景。激光制造用粉末材料是影响该技术应用和发展的关键因素之一, 其中铁基合金材料具有成本低、力学性能好、应用范围广等优势, 特别是不锈钢体系的铁基合金因其良好的力学性能和优异的耐蚀性能而逐渐成为研究关注的焦点。全面综述了国内外在铁基材料表面激光熔覆不锈钢涂层的相关研究进展。根据显微组织的不同, 目前采用激光熔覆技术制备的不锈钢涂层的类型主要有: 奥氏体型不锈钢、马氏体型不锈钢、铁素体型不锈钢以及双相型不锈钢。重点综述了激光工艺参数(激光功率、扫描速度、熔覆方式等)、合金元素(Al、Ni、B、Mo 等)、添加物(SiC、WC、VC、Cr₃C₂、Al₂O₃ 等陶瓷相)以及热处理(固溶处理、低温回火等)等因素对激光熔覆不锈钢涂层组织和性能的影响, 主要包括对熔覆层的相组成、截面几何尺寸、稀释率、残余应力、力学性能、耐蚀性能等的影响规律及微观机制。同时, 指出了目前在铁基材料表面激光熔覆不锈钢涂层领域中存在的主要问题及今后的发展方向。

关键词: 激光熔覆; 铁基合金; 不锈钢涂层; 激光工艺; 组织及性能

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0074-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.010

Research Progress of Laser Cladding Stainless Steel Coating on Fe-based Substrate

ZHU Hong-mei, HU Ji-peng, LI Bai-chun, LI Yong-zuo, QIU Chang-jun

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

ABSTRACT: Laser cladding technology is an important green manufacturing and remanufacturing technology to promote the upgrading of the national manufacturing industry. There are broad application prospects in key industrial fields such as aerospace, marine transportation, metallurgical machinery, etc. Powder materials are one of the key factors affecting the application and development of the laser manufacturing technology, among which Fe-based alloy materials possess their advantages such as low cost, good mechanical properties and wide application range. Specially, Fe-based stainless steel alloys have been the research focus due to the good mechanical properties and excellent corrosion resistance. The research progress of

收稿日期: 2019-06-12; 修订日期: 2020-02-04

Received: 2019-06-12; Revised: 2020-02-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1105803)

Fund: Supported by National Key R & D Program of China (2018YFB1105803)

作者简介: 朱红梅(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光增材制造。

Biography: ZHU Hong-mei (1982—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: laser additive manufacturing.

通讯作者: 邱长军(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为激光增材制造。邮箱: qiuchangjun106@126.com

Corresponding author: QIU Chang-jun (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: laser additive manufacturing. E-mail: qiuchangjun106@126.com

引文格式: 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 Hong-mei, HU Ji-peng, LI Bai-chun, et al. Research progress of laser cladding stainless steel coating on Fe-based substrate[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 74-84.

laser cladding Fe-based stainless steel coatings on the Fe-based substrate at home and abroad has been reviewed comprehensively. Currently, the types of stainless steel coatings have been divided into austenitic stainless steel, martensitic stainless steel, ferritic stainless steel and duplex stainless steel according to the microstructure. The effects of laser processing parameters (laser power, scanning speed, cladding mode, etc.), alloying elements (Al, Ni, B, Mo, etc.), additives (ceramic phases such as SiC, WC, VC, Cr₃C₂, Al₂O₃, etc.) and heat treatment (solid solution treatment, low-temperature tempering, etc.) on the microstructure and properties of the laser cladding stainless steel coatings have been emphasized. The effects mainly include the general rules and mechanism of the phase constitution, cross-section geometry, dilution ratio, residual stress, mechanical property and corrosion resistance. Besides, the main problems and the future development direction for laser cladding stainless steel coatings on Fe-based substrates have been pointed out.

KEY WORDS: laser cladding; Fe-based alloy; stainless steel coating; laser technology; structure and performance

激光熔覆 (Laser Cladding, LC) 是利用高能密度激光束使涂层粉末材料与基材表面薄层同时快速熔化, 并快速凝固形成涂层的先进绿色制造和再制造技术。与堆焊、喷涂、电镀和气相沉积等方法相比, 激光熔覆技术所制备的涂层具有与基体呈冶金结合、稀释率低、热影响区小、组织细小致密等一系列优势^[1-3]。利用激光熔覆技术对已失效的零部件进行修复, 实现再制造, 具有重要的经济效益和社会意义, 符合“中国制造 2025”绿色发展理念。

目前, 激光熔覆用合金粉末材料体系主要有: 铁基合金、钴基合金、镍基合金。其中, 铁基合金具有成本低、耐磨性好等优点, 一直成为研究关注的焦点。化工、海洋、航空航天等领域对材料的耐蚀性能也提出了要求, 因此国内外学者们做了大量利用激光熔覆技术在铁基合金表面制备不锈钢涂层的相关工作。主要的涂层体系有: 奥氏体型不锈钢 (Austenitic Stainless Steel, ASS)、马氏体型不锈钢 (Martensitic Stainless Steel, MSS)、铁素体型不锈钢 (Ferritic Stainless Steel,

FSS) 以及双相型不锈钢 (Duplex Stainless Steel, DSS) 等。研究工作主要集中在激光工艺参数、合金元素、添加物和热处理等因素对不锈钢激光熔覆涂层组织性能的影响规律及微观机制。

本文重点综述了铁基合金表面激光熔覆不锈钢涂层的国内外研究现状和进展, 并指出了目前该研究领域存在的主要问题和今后的发展方向。

1 奥氏体型不锈钢涂层体系

奥氏体型不锈钢 (ASS) 具有良好的塑韧性、焊接性、耐腐蚀和抗氧化能力, 广泛应用于各工业领域。国内外大量研究表明, 通过激光熔覆技术制备的 ASS 涂层可提高铁基材料基体的冲击强度^[4]、显微硬度和耐磨性^[5-6]、耐蚀性^[7-10], 同时激光工艺参数、合金元素、添加物和热处理等因素对涂层的组织性能存在较大的影响。目前, 文献报道的 ASS 激光熔覆涂层成分如表 1 所示, 可见主要集中在 316L、304 这两类。

表 1 文献报道的 ASS 激光熔覆涂层
Tab.1 ASS laser cladding coatings reported by literature

Alloy	Fe	Cr	Ni	Mo	Al	C	Others	Ref.	%
316L	Bal.	16~18	10~14	2.0~3.0	—	≤0.03	P, S, Mn, Si	[4-6,11-12,18-19,22,25,28-29,33]	
304	Bal.	18~20	8~11	—	—	≤0.08	P, S, Mn, Si	[8,14,16-17,20-21,23-24,26,30-32,35]	
Metco-41C	Bal.	17	12	2.50	—	0.10	Si	[7]	
FeCrNiMo	Bal.	16.80	11.50	2.60	—	0.20	Si, Mn	[9]	
FeCrNiSi	Bal.	14.28	3.29	—	—	0.23	Si	[10]	
FeCrNiMo	Bal.	17	14	2.75	0.32	<0.03	P, Co, In, W	[13]	
FeNiCrAl	Bal.	14.19	19.95	—	0~5	<0.10	Mn, Si, Nb, B	[15]	
FeCrNiMo	Bal.	16	8.00	6.00	6.00	0.10	—	[27]	
308L	Bal.	16~18	10~14	2.0~3.0	—	≤0.03	P, S, Mn, Si	[34]	

1.1 激光工艺参数的影响

激光功率 P 对熔覆层的截面几何尺寸 (高度 H 、宽度 W , 见图 1)^[11-12]、显微硬度^[13]、成形质量^[14-15]存在较大影响。吴兆坤等^[11]通过预置法制备出 316L

ASS 涂层, 发现随着 P 的提高 (1.0~2.0 kW), 熔覆层吸收的热量增多, 熔覆的粉末量增大, H 增加。咎少平等^[12]通过激光熔覆单道 316L ASS 涂层发现, P 越高 ($P \leq 0.5$ kW), W 越大。张美美等^[13]在 45# 钢表面制备出自制 ASS 涂层, 发现熔覆层的显微硬度随

着 P 的增大 (1.5~2.3 kW) 而提高, 最高可达 $(610 \pm 10) \text{HV}_{0.2}$, 约为基体的 4 倍。郭卫等^[14]采用数值模拟和实验研究发现, 随着 P 的增大 (2.1~2.7 kW), 热影响区的宽度增大, 基体变形量增大。当 P 为 2.5 kW、扫描速度为 780 mm/min 时, 成形性最佳。樊丁等^[15]在 304 不锈钢表面激光熔覆制备了 Fe-Ni-Cr-Al ASS 涂层。发现当 P 为 1.5 kW 时, 涂层表面平整, 无任何缺陷, 且与基体呈冶金结合; 当 P 过小 (1 kW) 时, 因熔覆温度较低导致熔覆层与基体结合较差; 当 P 过大 (2 kW) 时, 由于飞溅, 易造成凹坑、裂纹等缺陷。可见, 随着激光功率 P 的增大, 热输入增大, ASS 涂层的截面几何尺寸和硬度增大, 但 P 过大时, 易产生缺陷而导致成形质量变差。

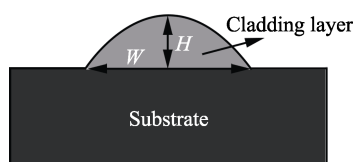


图1 熔覆层截面几何尺寸要素
Fig.1 Geometrical dimension elements of the cross-section cladding layer

扫描速度 V 对熔覆层的截面几何尺寸、显微硬度和稀释率存在显著影响。在截面几何尺寸方面, Lin 等^[16-17]利用 ANSYS 软件对 304ASS 激光熔覆过程中的温度场进行模拟, 并通过实验研究发现, 随着 V 增加 (400~1200 mm/min), 激光对熔池的搅拌作用减小, 不锈钢熔液保持球状趋势增加, 304ASS 熔覆层的高度 H 增大。然而, 白梅等^[18]在 Q235 钢基体上激光熔覆单道 316L ASS 涂层指出, 随着 V 增加 (80~170 mm/min), 单位体积粉末吸收能量降低, 粉末熔化充分而导致熔覆层 H 降低。黄小伟等^[19]研究发现, 当激光功率 P 和喷粉速率 Q_m 一定时, 随着 V 的增加, 316L ASS 熔覆层的 H 、 W 相应减小, 同时建立了工艺参数组合与单层截面几何尺寸的线性关系 (见公式 (1)、(2))。胥少平等^[12]发现, 当其他工艺参数一定时, V 过大会导致热输入不足, 粉末熔化不均匀, 难以形成连续的 316L ASS 熔覆条。在显微硬度方面。张美美等^[13]研究发现, 熔覆层的显微硬度值随着 V 的增加 (120~960 mm/min) 而增大, 这是由于熔覆层组织随 V 增加而细化所致。Xu 等^[20]在 45# 钢基体表面激光熔覆制备出 304ASS/ Al_2O_3 涂层, 发现随着 V 的增加 (600~1000 mm/min), 熔覆层的显微硬度值增大, 但耐磨性无变化。在稀释率方面, 郭卫等^[21]通过数值模拟和实验相结合的方法, 研究了不同扫描速度下 304 ASS 激光熔覆层的变化, 发现随着 V 的提高 (120~960 mm/min), 涂层稀释率减小。可见, 扫描速度 V 对熔覆层截面几何尺寸的影响规律认识目前尚未达成一致, 但一般认为, 随着 V 的提高, 显微硬度增大, 稀释率降低。

$$H = \frac{0.0074 \sqrt[4]{PQ_m^3}}{V} + 0.0461 \quad (1)$$

$$W = 0.003 \sqrt[4]{\frac{P^3}{V}} - 0.0108 \quad (2)$$

众所周知, 激光的扫描路径会影响熔池的温度场分布, 从而影响熔覆层性能, 但目前该方面的文献报道并不多, 其影响规律仍有待详细研究。徐海岩等^[22]采用 ANSYS 软件模拟了在不同扫描路径下 (见图 2, 数字为单道扫描路径), 激光熔覆制备 316L ASS 涂层的温度场, 结合实验发现, 反向同侧 (图 2b) 熔覆时, 熔池温度比同向同侧 (图 2a) 熔覆时的熔池温度高, 故易产生过烧、坍塌等缺陷。此外, 异侧 (图 2c) 熔覆时, 温度场和内部组织更均匀, 性能更优。

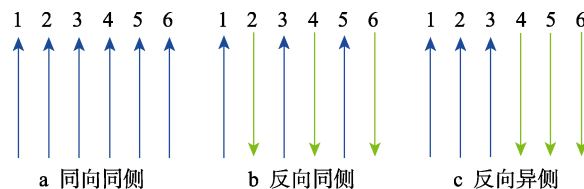


图2 三种激光扫描路径

Fig.2 Three laser scanning paths: a) same direction and same side; b) different direction but same side; c) different direction and different side

1.2 合金元素的影响

合金元素的添加对 ASS 熔覆层的性能存在较大影响, 目前国内外研究者们主要集中在显微硬度和耐腐蚀性方面。在显微硬度方面, 樊丁等^[15]通过激光熔覆制备了 Fe-Ni-Cr- $x\text{Al}$ ($x=0\%\sim 5\%$) ASS 涂层, 发现随着 Al 含量的增加, 涂层的显微硬度提高。这主要是由于 Al 元素可细化晶粒, 形成细小均匀的熔覆层组织所致。邱长军等^[23-24]在 304ASS 中分别添加微量 CH 化合物、硼砂和 Ni60A, 激光熔覆制备出三种涂层。结果发现, CH 化合物由于有一定的渗碳作用以及碳化物弥散强化作用, 可提高熔覆层的显微硬度 (26.83%); 同时添加 CH 化合物和硼砂时, 可明显减少气孔等缺陷, 提高耐磨性; 添加 Ni60A 发现, 试样的显微硬度和强度提高, 这主要由于 Ni 元素同时具有固溶强化和析出强化效应。Sun 等^[25]采用两种不同成分的 316L ASS 粉末 (Fe-0.15C-11.8Cr-0.15Mn-0.2Ni、Fe-0.09C-17.05Cr-1.2Mn-11.28Ni, %) 进行激光沉积, 研究发现, 前者形成了均匀的富 Cr 马氏体, 在固溶强化作用下, 其显微硬度是后者的 4 倍, 但后者形成了细小的胞状晶, 且由于铁素体和奥氏体的存在, 抗拉强度、抗弯强度优于前者。在耐腐蚀性的影响方面, Merwe 等^[26]对比了添加不同含量 Ru 元素的 304ASS 涂层在盐酸中的耐腐蚀性能, 发现 Ru 合金化后可使腐蚀电位正移, 氢过电位下降, 涂层耐蚀性提高, 当 Ru 含量为 2%~5% 时, 耐蚀性最佳。可见,

大量研究表明, 通过添加适当的合金元素, 由于细晶强化、弥散强化的作用, 可有效提高 ASS 涂层的力学性能。此外, 合适的合金化还可提高耐蚀性能。

1.3 添加物的影响

部分学者^[27-30]尝试在 ASS 粉末中添加 SiC、WC、Cr₃C₂、Al₂O₃ 等陶瓷相制备复合涂层, 发现这些陶瓷相的加入可显著提高涂层的力学性能, 但添加量需在适当范围, 过量反而会降低性能。杨永强等^[27]在 40Cr 钢基体表面激光熔覆 Fe-Cr-Ni-Mo ASS/SiC 涂层。结果表明, 随着 SiC 含量的增加 (5%~60%), 熔覆层的显微硬度提高, 当含量为 60% 时, 硬度值可达 1100HV。这主要是由于 SiC 在激光熔覆过程中分解的 Si、C 元素产生的固溶强化, 以及未熔 SiC 和析出相的弥散强化共同作用的结果。Song 等^[28]发现添加 WC 可提高 316L ASS 涂层的显微硬度和耐磨性。当 WC 含量为 24.4% 时, 熔覆层的显微硬度值最大 (550HV_{0.5}), 磨损量最少, 但随着含量的提高, 未熔 WC 颗粒增多, 磨损机制由粘附磨损变为磨粒磨损。Wang 等^[29]研究了 Cr₃C₂ 对 316L ASS 涂层的影响, 发现随着 Cr₃C₂ 含量的增加 (5%~25%), 熔覆层的显微硬度由 390HV 提高至 488HV。当含量为 15% 时, 耐磨性最佳, 这是由于原位合成的网状共晶碳化物细化了 γ -Fe。Xu 等^[30]在 45 钢表面通过预置粉末法制备出 304/Al₂O₃ 复合涂层。发现较原始纯 304ASS 涂层, 添加 10%Al₂O₃ 后, 熔覆层的显微硬度和耐磨性分别提高了 3 倍和 1 倍, 这主要由于 Al 元素可形成间隙固溶体, 阻碍位错滑移所致。304/Al₂O₃ 涂层的耐蚀性略低于纯 304 涂层, 但仍优于基体。此外, 朱红梅等^[31]通过在 304ASS 粉末中添加钛铁、硼铁、石墨粉末, 发现激光熔覆过程中原位生成了 Cr₂₃C₆、Cr₃C₂、TiO₂、Ti_{1.8}B₅₀ 等硬质增强相, 显著提高了熔覆层的显微硬度和耐蚀性。

1.4 熔覆次序和热处理的影响

目前, 研究熔覆次序和热处理对 ASS 涂层的影响报道较少, 一般认为熔覆层厚度影响其温度分布, 从而影响涂层不同位置的组织分布。郭卫等^[32]研究发现, 304ASS 涂层先熔覆区的抗拉强度和延伸率分别高于后熔覆区 5.7% 和 10.7%。一方面, 先熔覆区的熔池在凝固时的温度梯度较后熔覆区大, 故先熔覆区的晶粒尺寸较小; 另一方面, 先熔覆区会受到激光冲击的作用, 熔池中的金属颗粒物飞溅到后熔覆区, 导致后熔覆区夹杂, 强度下降。陈刚等^[33]在 27SiMn 表面制备了不同厚度的 316L ASS 涂层, 发现随着熔覆层厚度的增加 (0.3~1.0 mm), 显微硬度降低, 耐蚀性提高。这主要是由于涂层越厚, 散热能力越差, 导致涂层晶粒粗大, 故显微硬度降低; 当熔覆层厚度较小时, 受基材稀释的程度较大, Cr、Ni、Mo 等合金化元素含量减少, 组织由 A 向 M 转变, 从而耐腐蚀性较

差。Li 等^[34]在 316L ASS 基体上激光熔覆 308L ASS, 发现涂层由 A 和少量 F 组成, 且随熔覆层数增多, 冷速下降, F 含量增加。此外, 柴蓉霞等^[35]对 304ASS 激光熔覆层进行了固溶处理 (950 °C/h), 发现熔覆层组织分布均匀, 塑性提高。

2 马氏体型不锈钢涂层体系

马氏体型不锈钢 (MSS) 具有良好的力学性能、耐蚀性和可热处理性能。目前, 国内外在铁基合金表面激光熔覆 MSS 涂层的研究主要集中在 420、431、沉淀硬化马氏体型不锈钢 (Precipitation Hardening Martensitic Stainless Steel, PH MSS) 上。

2.1 420 MSS 涂层

420 MSS 具有高强度和硬度, 典型成分为: C 0.16%~0.25%, Cr 12%~14%, Mn ≤ 1.00%, Ni ≤ 0.60%, Si ≤ 1.00%, Fe 余量。其广泛应用于模具制造、医疗器械等领域。

硬度和残余应力是评价熔覆层性能的重要指标。Alam 等^[36]采用不同激光参数, 通过单道激光熔覆, 在碳素钢基体上制备了 420 MSS。涂层截面组织依次可分为: 熔覆区、结合区和热影响区。结果表明, 熔覆层的显微硬度和残余应力随激光功率和扫描速度增加而增加。熔覆层主要由共晶 F、M、A_r 和碳化物组成, 经熔覆后, 表层和熔覆区上部呈拉应力 (310~486 MPa), 而熔覆区下部和结合区呈压应力 (420~1000 MPa), 热影响区呈残余拉应力 (140~320 MPa)。经后热处理 (565 °C、1 h), 表层和次表层的拉应力降低, 压应力均匀分布在熔覆区和结合区; 在熔覆区析出了热应力诱发六方 M 和大量碳化物, 硬度和残余应力明显下降。同时, Alam 团队^[37-38]采用数值模拟和实验相结合的方法, 研究了激光工艺参数对显微硬度、残余应力、熔覆层截面几何尺寸的影响, 发现扫描速度和送粉率影响最大。对于单道激光熔覆试样, 随着激光功率/扫描速度的比值增加, 熔覆层显微硬度峰值下降, 送粉率/扫描速度的比值对硬度峰值几乎无影响。经 565 °C 不同时间 (10、30、60、90 min) 热处理后, 残余应力下降, 最佳热处理时间为 60 min。

工艺参数 (激光功率、送粉率、扫描速度、离焦量等) 影响熔覆层的截面几何尺寸 (高度、宽度、深度)^[39-41]。张永忠等^[39]在 0Cr18Ni10Ti 不锈钢表面激光熔化沉积 420 MSS。研究发现, 沉积层的高度和宽度随着激光扫描速度 (3~7 mm/s) 的增加而下降。Saqib 等^[40]采用数值模拟与实验相结合的方法发现, 激光熔覆 420 MSS 涂层的截面几何尺寸影响是非线性的, 且单道、多道、多层熔覆的影响规律不同。Zhang 等^[41]在 Q235 基体上激光熔覆 420 MSS+4%Mo 粉末, 利用数值模拟与实验相结合的方法研究了激光与粉

末的相互作用、温度场、熔覆层截面几何尺寸。结果发现：1) 随着扫描速度增加，熔覆层中的 Mo 含量降低，富 Mo 区比例提高，熔覆层室温组织为 M 和 F，且随着扫描速度的提高，F 含量降低。2) 熔池温度梯度 G 最大值出现在底部，熔覆层最表层最小，而熔池凝固速度 R 与之相反。熔覆层形貌从底部到顶部为胞状晶、柱状晶，细小枝晶。随着扫描速度增加， G 、 R 值随之增大，晶粒得到细化。3) 随着扫描速度的增加，热输入量下降，熔覆层高度、宽度减小。可见，420 MSS 多道熔覆涂层的截面几何尺寸随着扫描速度 V 的提高而减小，但不同熔覆方式的影响规律尚需系统研究。

激光扫描停留相当于对前一道/层进行了原位回火处理，故明显影响涂层的组织性能。Costa 等^[42]采用有限元模拟热传递过程和相变动力学，建立激光沉积热力学模型，揭示组织性能的关系，并应用该模型研究了基体尺寸和层间停留时间对 420 MSS 沉积层组织和显微硬度的影响。结果表明，沉积层上部由 M 和 A 组成，下部由 M_{tmp} 组成。随着基体尺寸的减小和层间停留时间的缩短， M_{tmp} 比例下降，显微硬度提高。Sun 等^[43]采用连续扫描 ($\Delta t_{\text{track}}=0$ s) 和间断扫描 ($\Delta t_{\text{track}}=80$ s) 两种方式，在基体 300M 表面激光熔覆制备了 420 MSS 涂层。对比发现，连续扫描试样呈脆性断裂，而间断扫描试样由于产生原位回火效应，其延伸率 (17.4%) 为连续扫描的 6 倍，强度仅略有下降，耐磨性能提高。

此外，添加物和热处理对涂层的组织性能存在显著影响。一般地，陶瓷相的添加或析出会提高涂层的力学性能，但添加量过大时会影响其成形质量^[44-45]。Zhang 等^[44]探索了不同添加含量 (0%~40%) 的 VC 对激光熔覆 420MSS 涂层组织性能的影响，发现随着 VC 比例的增加，熔覆层的表面粗糙度、裂纹敏感性、碳化物 (VC 、 V_8C_7 、 M_3C_7 、 $M_{23}C_6$) 析出量提高。Sun 等^[45]研究了不同含量 Fe-C-Cr-Nb-B-Mo 的添加对 420 MSS 涂层的影响，发现随着添加量的增大，析出大量硼化物、碳化物，硬度呈线性增加。当添加量为 40% 时，硬度值可达 952HV，且无裂纹等缺陷。进一步提高添加量 (大于 60%)，熔覆层出现大量裂纹。关于热处理对 420MSS 的影响鲜见文献报道，Zhu 等^[46]研究发现原始 420 MSS 熔覆层由 M、A、 Fe_3C 和 $M_{23}C_6$ 组成，经低温回火 (210 °C、1 h) 后，M 分解为细小的 M_{tmp} 、逆转变 A 和纳米 Fe_3C ，熔覆层的显微硬度、强度以及耐蚀性能略有下降 (6%~10%)，但延伸率显著提高 (1.6 倍)。

2.2 431 MSS 涂层

431 MSS 具有高强度、高韧性，典型成分为： $C \leq 0.20\%$ ， Cr 15%~17%， Ni 1.25%~2.50%， $Mn \leq 1.00\%$ ， $Si \leq 1.00\%$ ， $P \leq 0.04\%$ ， $S \leq 0.03\%$ ，Fe 余量。其广泛应用于潜艇发动机轴和汽轮机等。目前，对于

激光熔覆 431MSS 涂层的研究文献并不多，主要集中在激光工艺参数、合金元素和热处理等因素的影响方面，其影响规律仍有待于今后详细研究。

2.2.1 激光工艺参数的影响

Hemmati 等^[47-48]采用不同扫描速度 (5~117 mm/s)，在 304 钢基体上激光熔覆单层和 5 层 431 MSS 涂层，发现激光扫描速度不影响涂层中 A/M 的位向关系。但随着扫描速度的增加，熔覆层组织变细， M_s 点下降。对于单层熔覆层， A_r 比例增大，硬度和耐磨性下降；对于多层熔覆层，组织性能无明显变化。Mirzade 等^[49]建立了激光工艺参数、同步送粉过程、激光熔覆热动力学模型，并通过在碳钢表面激光熔覆 431 MSS 涂层，研究了激光工艺参数对熔池尺寸和稀释率的影响。研究发现，熔池深度随着激光功率的增加而增加，高度随扫描速度的增加而降低。

2.2.2 合金元素的影响

Wang 等^[50]在 45# 钢表面激光熔覆添加不同 Mo 含量 (2%、4%、6%) 的 431 MSS 粉末，发现随着 Mo 含量的增加，涂层中 $M_7(C,B)_3$ 相、M 比例下降，而 M_2B 、 $M_{23}(C,B)_6$ 、F 比例增加。元素 Mo 可细化熔覆层组织，随着 Mo 含量增加，显微硬度降低，耐磨性提高。431-6%Mo 涂层试样耐磨性最佳 (为原始 431 涂层试样的 3.7 倍)，耐蚀性先提高后降低；431-2%Mo 耐蚀性最佳。朱红梅等^[51]在 Q235 基体上激光熔覆含微量 B (0.10%) 的 431 MSS 粉末，发现熔覆层力学性能和耐蚀性优异 ($R_m=1352$ MPa， $A=12.3\%$)，这主要是由于元素 B 的加入，析出了 $M(B,C)$ 和 $M_{23}(B,C)_6$ 等硬质相，从而提高了涂层的强度。

2.2.3 热处理的影响

Liu 等^[52]研究发现，原始 431 MSS 激光熔覆层经回火 (680 °C、2 h) 后，组织由 F 和 $(Cr,Fe)_{23}C_6$ 组成，由于两者结合较弱，易在界面处形成裂纹。固溶处理可消除层间热影响区，随着固溶温度 (1000~1100 °C) 的提高，碳化物逐渐溶解，温度为 1050 °C 时，力学性能最佳 ($R_m=1283$ MPa)。

2.3 PH MSS 涂层

近年，学者们^[53-60]在激光熔覆 PH MSS 涂层方面也做了一些相关研究，主要集中在激光工艺参数、热处理、熔覆次序和添加物等因素对涂层组织性能的影响。

2.3.1 激光工艺参数的影响

Huang 等^[55]采用田口法研究了激光工艺参数对 FV520B PH MSS 涂层的影响，确定的最优参数为：激光功率 1.91 kW，扫描速度 390 mm/min，送丝速率 2.5 m/min，电流 50 A。他们还指出丝电流对成形质量的影响最大，其次是送丝率，激光功率和扫描速度的影响相对较小。然而，激光工艺参数对 PH MSS 涂层影响的文献报道鲜见，研究尚不系统。

2.3.2 热处理的影响

目前对于 PH MSS 涂层大多沿用的是传统的铸态不锈钢热处理工艺,即采用固溶处理均匀化熔覆态组织,时效处理实现析出强化。Cheruvathur 等^[56]利用激光熔覆技术在 45#钢基体上制备了 17-4PH MSS 涂层,涂层呈典型的树枝晶/胞状晶凝固组织,由近 50% M 和 50% A 组成。经去应力退火(650 ℃、1 h)后,可显著提高硬度,但对凝固组织无明显影响;经 1150 ℃均匀化退火后,可使凝固枝晶组织破碎,偏析程度降低,涂层由约 90% M 和 10% A 组成,硬度值与锻态相当。刘正武等^[57]采用激光增材制造技术制备了 05Cr15Ni5Cu4Nb PH MSS 试样,发现原始态呈枝晶态,由 M 和 F 组成。经时效热处理后,显微组织为 M_{tmp},并析出大量纳米 ε-Cu 和 NbC,强度提高。直接时效态(485 ℃,4 h)和固溶时效态(1040 ℃/1 h+485 ℃/4 h)的塑性稍有下降,但强度分别提高了 27.6%和 21.1%,调整时效态(780 ℃/1 h+485 ℃/4 h)的综合力学性能最佳。Sun 等^[58]对比研究了不同热处理对激光增材制造和锻态 17-4 PH MSS 的影响,发现:熔覆态试样呈铁素体柱状晶(存在明显的{100}织构),经固溶处理(1038 ℃、4 h)后,组织均匀化,织构消失,A_r比例下降(小于 1%);锻态试样为完全的 M 组织。锻态和熔覆态试样经时效处理(1038 ℃/4 h+482 ℃/1 h)后,均析出富 Cu 纳米颗粒相。

2.3.3 熔覆次序和添加物的影响

Wei 等^[59]采用激光热丝沉积法制备了 FV520B PH MSS 试样,熔覆层呈压应力,但热影响区因存在拉应力而形成微孔和裂纹。由于激光快热快冷特性,热影响区发生晶粒细化和析出相溶解。对于单层沉积试样,从熔覆层/热影响区的界面至热影响区,硬度

呈下降趋势;对于多层沉积试样,由于后一层对前一层的激光加热促进第二相析出,热影响区的硬度值最高。Wen 等^[60]利用激光热丝技术在 FV520B 基体上制备了 H12Cr13 MSS 涂层,发现单层熔覆层组织不均匀,可分为淬火区和回火区,拉伸强度与基体相当,但冲击韧性较低。然而,多层熔覆层试样由于后一层对前一层产生原位回火作用,M 细化,塑韧性明显提高。熔覆时添加 TiC 纳米颗粒,产生组织细化和析出强化效应,可进一步提高力学性能。可见,多层熔覆时,后一层对前一层产生了原位回火效应,从而影响了涂层的组织性能。此外,与其他不锈钢涂层类似,添加陶瓷相可提高 PH MSS 涂层的力学性能。

2.4 其他马氏体不锈钢

对于其他类型 MSS 涂层的研究相对较少。Wang 等^[61]研究了热处理对激光增材制造 1Cr12Ni2WMoVNB MSS 试样的影响,发现经 1150 ℃固溶处理后,试样组织由柱状晶转变为等轴晶,热影响区消除,枝间晶相溶解。回火态(1150 ℃固溶+580 ℃回火)试样的拉伸强度高于沉积态和铸态,韧性明显优于沉积态,但略低于铸态。

3 铁素体型不锈钢体系

铁素体不锈钢(FSS)具有含铬量高、耐腐蚀性能和抗氧化性能好、热膨胀系数小等特点。部分学者采用激光熔覆技术制备 FSS 涂层,以提高基体的耐腐蚀性能^[62-63]。相对于 ASS 和 MSS,目前对激光熔覆 FSS 涂层研究的文献报道较少,见表 2。研究表明,合金元素、添加物、热处理以及激光工艺参数等因素对 FSS 涂层的组织性能有较大影响,但具体的影响规律尚待今后的深入研究。

表 2 国内外目前报道的激光熔覆 FSS 涂层
Tab.2 Laser cladding FSS layers reported at home and abroad

Alloy	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	C	Others	Ref.
Fe-based	Bal.	24	5	5	—	0.2	B, Y, O	[62]
S44700	Bal.	29	—	4	—	≤0.01	N	[63]
Fe-based	Bal.	16.50	1.70	1	1.15	≤0.18	B, Mn	[64]
Fe-based	Bal.	13	—	0.8	12	—	B, C	[65]
410L	Bal.	12.7	0.08	0.01	0.47	0.01	P, S, Mn, Nb, Al, Cu, Ti, V	[66-68]
434L	Bal.	17~18	—	1.0~1.5	0.8	<0.03	P, Mn, O	[69]
RFC 103	Bal.	17	—	—	0.8	0.03	B, Mn	[70]

3.1 合金元素的影响

Zhang 等^[64]研究了 Ni 含量对自制 FSS 熔覆层组织性能的影响,发现随着 Ni 含量的增加(0%~9.15%),Cr_{eq}/Ni_{eq} 值下降,物相由 F(Ni=0%)转变为 A(Ni=9.15%),显微硬度由 643HV 降至 289HV,耐磨性能

下降,耐蚀性能提高。由于 Ni 元素的加入,散热方向和凝固模式发生改变,显微组织从等轴晶向柱状晶转变。

3.2 添加物的影响

Gao 等^[65]研究了激光离焦量和 Cr₃C₂ 添加物对

FSS 涂层的影响,发现在正离焦模式下,由于激光束能量密度从束流中心到边缘急剧下降,导致涂层/基体结合弱、稀释率高,在多道熔覆时,易在搭接区形成气孔,利用负离焦模式可有效避免。添加 5% Cr_3C_2 可细化 FSS 组织,涂层平均硬度 ($>1000\text{HV}_{0.2}$) 为基体的 5 倍。

3.3 热处理和激光工艺参数的影响

Lai 等^[66-67]在高碳钢表面激光熔覆制备了 410L 涂层,由于基体中碳元素的扩散,在热影响区发现 M 组织,通过 350 °C 预热与后热处理或者提高预热面积可消除。同时, Lai 等^[67-68]研究了熔覆方向对熔覆层的强度和断裂机理的影响,发现纵向熔覆制备的涂层性能优异且为韧性断裂。此外,激光熔覆的最佳工艺参数与粉末体系有关,410L 涂层的最佳工艺参数为:激光功率 3.2 kW,扫描速度 1000 mm/min,送粉率 3 rad/min。Wang 等^[69]采用激光熔覆技术制备出 434L FSS/ B_4C 复合涂层。研究发现,随着激光功率的增加 (1.8、2.1、2.4 kW),涂层中的气孔数量减小。这主要由于输入能量较高时,混合粉末长期保持液态,可消除涂层中的微孔。此外,激光功率的提高直接影响熔体的温度场,熔池中心和边缘的温度梯度增大,由于对流作用,导致硼化物和碳化物相的形貌由不规则的层状转变为球状或棒状。张若宾等^[70]在 45# 钢表面单道熔覆了 RFC 103 FSS 涂层,发现影响熔覆层形貌的主要因素为扫描速度和离焦量,次要因素为

送粉量和激光功率,并采用单因素变量法优化了工艺参数。

4 双相型不锈钢体系

双相型不锈钢 (DSS) 因兼有 FSS 较高的强度、耐应力腐蚀性能和 ASS 优良的塑韧性,在航海、石油、化工等领域应用广泛,但目前仅有几篇文献报道了激光熔覆 DSS 涂层 (见表 3)。Saeidi 等^[71]制备的 00Cr22Ni7Mo4N DSS 激光熔覆层由“马赛克”型组织 (100~150 μm) 组成,在其晶界区存在大量纳米级尺寸的位错环和富氮区,力学性能优异, R_m 和 R_e 分别为 1321 MPa 和 1214 MPa, A 大于 45%, 优于传统的 ASS、FSS、DSS。王程锦等^[72]在 Q235 钢表面直接激光沉积不同 Mo 含量 (0%~4%) 的 15Cr21Ni7 DSS 试样。研究表明,沉积层的耐蚀性随着 Mo 含量的增加,先提高后降低,当 Mo 含量为 3% 时,耐蚀性最佳。这主要是由于 Mo 与 C 的亲合力比 Cr 强,生成 MoC,使基体中 Cr 含量增加,从而提高了耐蚀性。当 Mo 含量继续增大时,由于 Fe-Cr-Mo 相的形成,耐蚀性下降。靳鸣等^[73]研究了 TiC 添加物含量 (0%~15%) 对 00Cr22Ni5Mo3NDSS 涂层组织性能的影响,发现原始态试样由 α 和 γ 相组成,添加 TiC 后,熔覆层中的 γ 相消失,主要由 α 相和碳化物组成。当 TiC 为 15% 时,重新出现少量 γ 相。涂层的显微硬度和耐磨性随着 TiC 含量的增加而提高。

表 3 国内外目前报道的激光熔覆 DSS 涂层
Tab.3 Laser cladding DSS layers reported at home and abroad

Alloy	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	C	Others	Ref.
00Cr22Ni7Mo4N	Bal.	25	7.00	4.00	—	0.03	Mn, N	[71]
15Cr21Ni7	Bal.	21.2	7.10	0.25	0.22	0.15	Mn	[72]
00Cr22Ni5Mo3N	Bal.	22	6.00	3.20	—	0.05	Mn	[73]

5 结论与展望

激光熔覆技术制备不锈钢涂层的研究经过近几十年的发展,在涂层成分、激光工艺及涂层性能优化等方面积累了大量的实验数据和理论基础,但至今尚未大规模应用于实际工业生产中。目前,大部分国内外学者们对铁基材料表面激光熔覆不锈钢涂层的研究集中在合金元素、激光工艺参数以及后热处理等因素对其组织性能的影响方面,主要存在的问题及今后的发展方向如下。

1) 不锈钢涂层的成分设计和控制。可通过调整不锈钢粉末中的铁素体形成元素和奥氏体形成元素的含量 (分别用 Cr 当量 Cr_{eq} 和 Ni 当量 Ni_{eq} 表示,见公式(3)、(4)^[74]),参考 Schaeffler 相图 (如图 3),进行不同体系的不锈钢涂层成分设计。然而,由

于在激光熔覆过程中,涂层成分易受基体外延生长层及熔池流动传质过程的影响,往往会偏离设计的名义成分;同时,在高温激光熔覆过程中,不可避免地存在合金元素发生部分氧化和烧损等问题。因此,需在传统成分设计的基础上,结合激光熔覆技术的工艺特点,设计出适合激光熔覆条件下的专用不锈钢粉末体系成分。同时,建立成分、工艺、组织与性能的数据库,实现在不锈钢粉体设计阶段对涂层性能的预测及调控。

$$\text{Cr}_{\text{eq}} = \text{Cr} + 2\text{Si} + 1.5\text{Mo} + 5\text{V} + 5.5\text{Al} + 1.75\text{Nb} + 1.5\text{Ti} + 0.75\text{W} \quad (3)$$

$$\text{Ni}_{\text{eq}} = \text{Ni} + \text{Co} + 0.5\text{Mn} + 0.3\text{Cu} + 25\text{N} + 30\text{C} \quad (4)$$

添加微合金元素/增强相是有效改善不锈钢熔覆层性能的途径之一。目前国内外的研究利用合金元素 Al 和陶瓷相等产生的细晶强化, Ni、B、Si、Cu 等合金元素产生的固溶强化以及析出强化来提高熔覆层

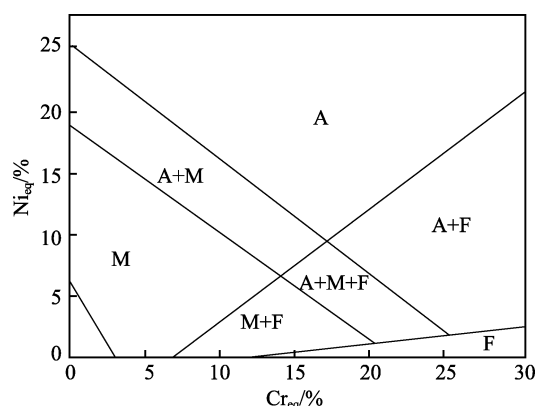


图 3 舍弗勒相图
Fig.3 Schaeffler diagram

的力学性能,通过元素 Ru、Mo 改善涂层的耐蚀性等。因此,在不锈钢涂层的成分设计中可结合多种强化机制实现熔覆层性能的优化。

此外,面向现场增材修复都存在对象钢号多、性能参数宽、大气作业环境温度范围大、部件预处理和后处理困难、优化的工艺参数易波动的特点,设计并开发集约化的不锈钢粉末材料体系,匹配不同基体对象,实现在现场作业工艺窗口区间大的条件下的制造与再制造,是未来重点研发的一个方向。

2) 不锈钢涂层的激光工艺与扫描路径的制定和优化。大量研究表明,激光工艺参数(激光功率、送粉率、扫描速度、离焦量等)与扫描路径显著影响熔覆层的成形质量。通过建立激光工艺、熔覆层的温度场与应力场、组织及性能的数据库,逐步制定不同系列不锈钢涂层以及不同结构部件的激光熔覆工艺标准,结合在线智能监测系统,从而实时调整工艺参数,实现集成化、智能化,以获得近净成形的表面涂层。通过调整扫描路径与方式,或通过对基材局部位引热用热源或冷源,改变熔覆层的温度场和应力场分布,从而实现相变与相比比例的调控,也是改善涂层组织性能的有效方式。

3) 数值模拟方面。激光熔覆层的性能受粉末成分、激光工艺参数、热处理等因素影响较大。合理的数值模拟对实验和理论分析具有指导作用,采用数值模拟将有助于粉末成分设计、组织分析、热处理工艺优化设计等。例如采用 Pandat、第一性原理进行热力学计算及粉末成分初步优化;采用 ANSYS、SYSWELD 软件对熔覆成形过程的温度场及应力-应变进行数值模拟;采用 Thermo-calc 软件对热处理工艺进行模拟,分析组织的转变过程。

4) 不锈钢涂层的热处理工艺制定和优化。由于激光熔覆技术快热快冷的特性,所制备的不锈钢涂层存在内应力及接近淬火态组织,因此可考虑预热和/或后热处理来改善熔覆层的组织和性能。目前对激光熔覆不锈钢涂层后热处理方面的研究较少,且大部分

沿用传统锻件或铸件不锈钢的热处理工艺,故适合于激光熔覆试样的热处理及工艺参数的影响规律还有待进一步深入研究。此外,部分学者已尝试激光重熔等原位热处理工艺,探索适合于工业化应用的热处理方式是大规模应用的关键。

5) 不锈钢涂层与基材的界面匹配。涂层与基材的界面匹配对于服役性能十分关键。例如,元素碳对高强硬 MSS 激光熔覆层和界面的裂纹敏感性和塑韧性影响显著。由于在激光熔覆过程中,涂层/基体界面处不可避免发生来自基体元素的扩散,因此在对中高碳钢进行激光增材复合制造或再制造时,易发生因基体浅表层中 C 元素的扩散导致界面处增碳脆化现象。然而,目前对激光熔覆层/中高碳钢基材界面处的精细微区组织、成分分布及拉伸疲劳力学性能,特别是如何解决中高碳钢激光表面增材制造出现界面增碳脆化难题的文献报道鲜见。因此,可以采用“界面成分组织梯度化”思路,比如在高端装备领域广泛使用的中高碳钢基材表面,通过引入过渡层,实现控碳控构性的界面强韧化。界面行为与扩散行为,以及基材预处理与过渡层,对界面特性的影响,值得进一步深入研究。

参考文献:

- [1] TAMANNA N, CROUCH R, NAHER S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process[J]. Optics and lasers in engineering, 2019, 122: 151-163.
- [2] 王志文, 庄宿国, 刘海青, 等. 激光熔覆自润滑复合涂层研究进展及发展趋势[J]. 表面技术, 2018, 47(5): 104-112.
WANG Zhi-wen, ZHUANG Su-guo, LIU Hai-qing, et al. Research progress and development trend of self-lubricating composite coatings by laser cladding[J]. Surface technology, 2018, 47(5): 104-112.
- [3] 练国富, 姚明浦, 陈昌荣, 等. 激光熔覆多道搭接成形质量与效率控制方法[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 229-239.
LIAN Guo-fu, YAO Ming-pu, CHEN Chang-rong, et al. Control of the quality and efficiency of multi-track overlapping laser cladding[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 229-239.
- [4] 申卫国, 方艳, 董玲, 等. 液压支架激光熔覆不锈钢合金涂层的实验研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(18): 2533-2538.
SHEN Wei-guo, FANG Yan, DONG Ling, et al. Experimental study of stainless steel alloy coating fabricated by laser cladding onto hydraulic support[J]. China mechanical engineering, 2015, 26(18): 2533-2538.
- [5] 叶四友, 刘建永, 杨伟. 激光熔覆 316L 不锈钢涂层组织和性能的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 48-53.
YE Si-you, LIU Jian-yong, YANG Wei. Microstructure and properties of laser cladded 316L stainless steel layer [J]. Surface technology, 2018, 47(3): 48-53.
- [6] ZHANG M, LIU B, BAI P. Microstructure and properties

- of laser cladding of 316L stainless steel on hydraulic support tube[J]. Journal of measurement science and instrumentation, 2017, 8(2): 154-161.
- [7] PAUL C P, GANDHI B K, BHARGAVA P, et al. Cobalt-free laser cladding on AISI type 316L stainless steel for improved cavitation and slurry erosion wear behavior[J]. Journal of materials engineering and performance, 2014, 23(12): 4463-4471.
- [8] 戴晓琴, 陈瀚宁, 雷剑波, 等. 激光增材制造 304 不锈钢显微结构特征与性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(16): 83-86.
DAI Xiao-qin, CHEN Han-ning, LEI Jian-bo, et al. Study on microstructure characteristics and properties of 304 stainless steel by laser additive manufacturing[J]. Hot working technology, 2017, 46(16): 83-86.
- [9] 范丽, 陈海龔, 董耀华, 等. 激光熔覆铁基合金涂层在 HCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 金属学报, 2018, 54(7): 1019-1030.
FAN Li, CHEN Hai-yan, DONG Yao-hua, et al. Corrosion behavior of Fe-based laser cladding coating in hydrochloric acid solutions[J]. Acta metallurgica sinica, 2018, 54(7): 1019-1030.
- [10] ZHANG P, LIU Z. Physical-mechanical and electrochemical corrosion behaviors of additively manufactured Cr-Ni-based stainless steel formed by laser cladding[J]. Materials and design, 2016, 100: 254-262.
- [11] 吴兆坤, 丘斌林, 周玉重, 等. 316L 不锈钢激光熔覆层的组织与硬度分析[J]. 上海工程技术大学学报, 2014, 28(2): 106-110.
WU Zhao-kun, QIU Bin-lin, ZHOU Yu-chong, et al. Microstructure and hardness analysis of 316L stainless steel layer by laser cladding[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2014, 28(2): 106-110.
- [12] 咎少平, 焦俊科, 张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 223-230.
ZAN Shao-ping, JIAO Jun-ke, ZHANG Wen-wu. Study on laser cladding process of 316L stainless steel powder[J]. Laser & optoelectronics progress, 2016, 53(6): 223-230.
- [13] 张美美, 白培康, 刘斌. 45#钢管激光熔覆不锈钢粉末的参数研究[J]. 铸造, 2017, 66(12): 1308-1312.
ZHANG Mei-mei, BAI Pei-kang, LIU Bin. Study on parameters of laser cladding stainless steel alloy powder with 45 steel tubes[J]. Foundry, 2017, 66(12): 1308-1312.
- [14] 郭卫, 张亚普, 柴蓉霞. 单道次激光熔覆 304 不锈钢数值模拟与工艺试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091401.
GUO Wei, ZHANG Ya-pu, CHAI Rong-xia. Numerical simulation and experimental study in single track laser cladding 304 stainless steel[J]. Laser and optoelectronics progress, 2019, 56(9): 091401.
- [15] 樊丁, 刘红涛, 张建斌, 等. 304 不锈钢表面激光熔覆 FeNiCrAl 涂层的研究[J]. 应用激光, 2010, 30(4): 304-309.
FAN Ding, LIU Hong-tao, ZHANG Jian-bin, et al. Research of laser cladding FeNiCrAl coating on 304 stainless steel [J]. Applied laser, 2010, 30(4): 304-309.
- [16] JU H, XU P, LIN C, et al. Test and temperature field of finite element simulation about the effect of scanning speed on 304 stainless layer's properties by laser cladding[J]. Materials research innovations, 2015, 19(S8): 9-13.
- [17] 徐鹏, 林成新, 周超玉, 等. 激光熔覆 304 不锈钢涂层的工艺及组织[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(7): 142-146.
XU Peng, LIN Cheng-xin, ZHOU Chao-yu, et al. Preparation and microstructure of 304 stainless steel layer by laser cladding[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2013, 34(7): 142-146.
- [18] 白梅, 刘斌, 廖海红, 等. 基于激光熔覆不锈钢涂层技术的工艺及腐蚀性研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(6): 125-128.
BAI Mei, LIU Bin, LIAO Hai-hong, et al. Research on technology and corrosion resistance of laser cladding 316L stainless steel coating[J]. Hot working technology, 2015, 44(6): 125-128.
- [19] 黄小伟, 刁俊通, LEBRUN J L, 等. 工艺参数对激光熔覆成形 316L 不锈钢形状的影响规律[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 117-122.
HUANG Xiao-wei, XI Jun-tong, LEBRUN J L, et al. Influences of processing parameters on geometric characterizations of laser cladding forming 316L stainless steel[J]. Laser and optoelectronics progress, 2011, 48(7): 117-122.
- [20] XU P, LIN C, YI X, et al. Research on effect of scanning velocity on laser cladding AISI 304 stainless steel/ Al_2O_3 composite coating[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 433-435: 2054-2057.
- [21] 郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 激光熔覆 304 不锈钢稀释效应的数值模拟与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051402.
GUO Wei, LI Kai-kai, CHAI Rong-xia, et al. Numerical simulation and experimental of dilution effect in laser cladding 304 stainless steel[J]. Laser and optoelectronics progress, 2019, 56(5): 051402.
- [22] 徐海岩, 李涛, 李海波, 等. 316L 激光熔覆质量预测及路径选择研究[J]. 激光技术, 2018, 42(1): 53-59.
XU Hai-yan, LI Tao, LI Hai-bo, et al. Study on quality prediction and path selection of 316L laser cladding[J]. Laser technology, 2018, 42(1): 53-59.
- [23] 刘武, 张彦, 陈勇, 等. CH 化合物和 Ni60A 对激光快速成形试件组织与力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 73-76.
LIU Wu, ZHANG Yan, CHEN Yong, et al. Influence of CH compound and Ni60A on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel specimens by laser rapid forming[J]. Transactions of the China welding institution, 2015, 36(5): 73-76.
- [24] 张彦, 刘赞, 邱长军, 等. 添加物对激光再制造试样组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(S1): 156-160.
ZHANG Yan, LIU Zan, QIU Chang-jun, et al. Influence of additive on microstructure and property of sample fabricated by laser remanufacture[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2015, 36(S1): 156-160.
- [25] SUN G F, SHEN X T, WANG Z D, et al. Laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel: Influence of feeding powder compositions on microstructure and mechanical properties[J]. Optics and laser technology, 2019, 109: 71-83.
- [26] MERWE J V, THARANDT D. Corrosion resistance of

- laser clad 304L stainless steel enriched with Ru in hydrochloric acid[J]. Corrosion engineering, science and technology, 2017, 52(1): 54-60.
- [27] 杨永强, 文效忠. 激光熔覆 SiC/不锈钢粉末复合涂层的组织与性能[J]. 中国激光, 2000, 27(10): 941-946.
YANG Yong-qiang, WEN Xiao-zhong. Microstructure and performance of SiC/stainless steel composite coating produced by Nd:YAG laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2000, 27(10): 941-946.
- [28] SONG L, ZENG G, XIAO H, et al. Repair of 304 stainless steel by laser cladding with 316L stainless steel powders followed by laser surface alloying with WC powders[J]. Journal of manufacturing processes, 2016, 24: 116-124.
- [29] WANG S, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Effect of Cr_3C_2 content on 316L stainless steel fabricated by laser melting deposition[J]. Vacuum, 2018, 147: 92-98.
- [30] XU P, LIN C, ZHOU C, et al. Wear and corrosion resistance of laser cladding AISI 304 stainless steel/ Al_2O_3 composite coatings[J]. Surface & coatings technology, 2014, 238: 9-14.
- [31] 尹泉, 彭如恕, 朱红梅. 激光熔覆原位生成增强相强化铁基涂层性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 99-104.
YIN Quan, PENG Ru-shu, ZHU Hong-mei. Performance improvement of iron base coating by laser cladding in-situ generated reinforced phase[J]. Surface technology, 2016, 45(4): 99-104.
- [32] 郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 扫描顺序对激光熔覆 304 钢组织和性能的影响[J]. 激光与红外, 2018, 48(9): 1087-1093.
GUO Wei, LI Kai-kai, CHAI Rong-xia, et al. Influence of the scanning sequence on microstructure and mechanical property of 304 steel by laser cladding[J]. Laser & infrared, 2018, 48(9): 1087-1093.
- [33] 陈刚, 范才河, 曾广胜, 等. 熔覆层厚度对激光熔覆 316L 涂层组织及性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(12): 53-58.
CHEN Gang, FAN Cai-he, ZENG Guang-sheng, et al. Influence of cladding layer thickness on structure and properties of laser cladding 316L coating[J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2018, 45(12): 53-58.
- [34] LI K, LI D, LIU D, 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.
- [35] 柴蓉霞, 李凯凯, 郭卫, 等. 热处理工艺对 304 不锈钢熔覆层组织和性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 279-285.
CHAI Rong-xia, LI Kai-kai, GUO Wei, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of 304 stainless steel cladding layers[J]. Laser and optoelectronics progress, 2018, 55(5): 279-285.
- [36] ALAM M K, EDRISY A, URBANIC J, et al. Microhardness and stress analysis of laser-clad AISI 420 martensitic stainless steel[J]. Journal of materials engineering and performance, 2017, 26(3): 1076-1084.
- [37] ALAM M K, URBANIC R J, NAZEMI N, et al. Predictive modeling and the effect of process parameters on the hardness and bead characteristics for laser-clad stainless steel[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 94(1-4): 397-413.
- [38] NAZEMI N, URBANIC J, ALAM M. Hardness and residual stress modeling of powder injection laser cladding of P420 coating on AISI 1018 substrate[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 93(9-12): 3485-3503.
- [39] 张永忠, 涂义, 黄灿. 0Cr18Ni10Ti 不锈钢表面激光熔化沉积 420 不锈钢的组织及性能[J]. 应用激光, 2009, 29(6): 473-475.
ZHANG Yong-zhong, TU Yi, HUANG Can. Microstructure and properties of laser direct deposited 420 stainless steel on 0Cr18Ni10Ti stainless steel[J]. Applied laser, 2009, 29(6): 473-475.
- [40] SAQIB S M, URBANIC R J. Investigation of the transient characteristics for laser cladding beads using 420 stainless steel powder[J]. Journal of manufacturing science and engineering, 2017, 139(8): 081009.
- [41] ZHANG Z, FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Laser cladding of 420 stainless steel with molybdenum on mild steel A36 by a high power direct diode laser[J]. Materials and design, 2016, 109: 686-699.
- [42] COSTA L, VILAR R, RETI T, et al. Rapid tooling by laser powder deposition: Process simulation using finite element analysis[J]. Acta materialia, 2005, 53(14): 3987-3999.
- [43] SUN S D, FABIJANIC D, BARR C, et al. In-situ quench and tempering for microstructure control and enhanced mechanical properties of laser clad AISI 420 stainless steel powder on 300M steel substrates[J]. Surface & coatings technology, 2018, 333: 210-219.
- [44] ZHANG Z, YU T, KOVACEVIC R. Erosion and corrosion resistance of laser clad AISI 420 stainless steel reinforced with VC[J]. Applied surface science, 2017, 410: 225-240.
- [45] SUN S D, FABIJANIC D, GHADERI A, et al. Microstructure and hardness characterisation of laser coatings produced with a mixture of AISI 420 stainless steel and Fe-C-Cr-Nb-B-Mo steel alloy powders[J]. Surface & coatings technology, 2016, 296: 76-87.
- [46] ZHU H, LI Y, LI B, et al. Effects of low-temperature tempering on microstructure and properties of the laser-clad AISI 420 martensitic stainless steel coating[J]. Coatings, 2018, 8(12): 451.
- [47] HEMMATI I, OCELIK V, DE HOSSON J T M. Microstructural characterization of AISI 431 martensitic stainless steel laser-deposited coatings[J]. Journal of materials science, 2011, 46(10): 3405-3414.
- [48] HEMMATI I, OCELIK 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 & coatings technology, 2011, 205(21): 5235-5239.
- [49] MIRZADE F K, NIZIEV V G, PANCHENKO V Y, et al. Kinetic approach in numerical modeling of melting and crystallization at laser cladding with powder injection[J]. Physica B: Condensed matter, 2013, 423: 69-76.
- [50] WANG K, CHANG B, CHEN J, et al. Effect of molybdenum on the microstructures and properties of stainless steel coatings by laser cladding[J]. Applied sciences, 2017, 7(10): 1065.
- [51] 朱红梅, 李勇作, 张振远, 等. 激光熔覆制备马氏体/铁

- 素体双相不锈钢层的力学与腐蚀性能研究[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 148-153.
- ZHU Hong-mei, LI Yong-zuo, ZHANG Zhen-yuan, et al. A study on the mechanical and corrosion properties of the martensite/ferrite dual-phase stainless steel coating prepared by laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2018, 45(12): 148-153.
- [52] LIU Y, LI A, CHENG X, et al. Effects of heat treatment on microstructure and tensile properties of laser melting deposited AISI 431 martensitic stainless steel[J]. Materials science and engineering A, 2016, 666: 27-33.
- [53] 徐滨士, 方金祥, 董世运, 等. FV520B 不锈钢激光熔覆热影响区组织演变及其对力学性能的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(1): 1-9.
- XU Bin-shi, FANG Jin-xiang, DONG Shi-yun, et al. Heat-affected zone microstructure evolution and its effects on mechanical properties for laser cladding FV520B stainless steel[J]. Acta metallurgica sinica, 2016, 52(1): 1-9.
- [54] LIN X, CAO Y, WU X, et al. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 17-4PH stainless steel[J]. Materials science and engineering A, 2012, 553(15): 80-88.
- [55] HUANG Z, WANG G, WEI S, et al. Process improvement in laser hot wire cladding for martensitic stainless steel based on the Taguchi method[J]. Frontiers of mechanical engineering, 2016, 11(3): 242-249.
- [56] CHERUVATHUR S, LASS E A, CAMPBELL C E. Additive manufacturing of 17-4 PH stainless steel: Post-processing heat treatment to achieve uniform reproducible microstructure[J]. Journal of metals, 2016, 68(3): 930-942.
- [57] 刘正武, 程序, 李佳, 等. 激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢的热处理工艺[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 155-162.
- LIU Zheng-wu, CHENG Xu, LI Jia, et al. Heat-processing technology for laser additive manufacturing of 05Cr15Ni-5Cu4Nb precipitation-hardening stainless steels[J]. Chinese journal of lasers, 2017, 44(6): 155-162.
- [58] SUN Y, HEBERT R J, AINDOW M. Effect of heat treatments on microstructural evolution of additively manufactured and wrought 17-4PH stainless steel[J]. Materials and design, 2018, 156: 429-440.
- [59] WEI S, WANG G, YU J, et al. Competitive failure analysis on tensile fracture of laser-deposited material for martensitic stainless steel[J]. Materials and design, 2017, 118: 1-10.
- [60] WEN P, CAI Z, FENG Z, et al. Microstructure and mechanical properties of hot wire laser clad layers for repairing precipitation hardening martensitic stainless steel[J]. Optics & laser technology, 2015, 75: 207-213.
- [61] WANG Y D, TANG H B, FANG Y L, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited 1Cr12Ni2WMoVNb steel[J]. Materials science and engineering A, 2010, 528: 474-479.
- [62] 田兴强. 激光熔覆铁素体不锈钢涂层的耐腐蚀性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(12): 1251-1254.
- TIAN Xing-qiang. Corrosion resistance of laser cladding layer with ferrite stainless steel[J]. Special casting & non-ferrous alloys, 2015, 35(12): 1251-1254.
- [63] 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, 1996, 88(1-3): 96-102.
- [64] ZHANG H, ZHANG C H, WANG Q, et al. Effect of Ni content on stainless steel fabricated by laser melting deposition[J]. Optics and laser technology, 2018, 101: 363-371.
- [65] GAO W, ZHAO S, LIU F, et al. Effect of defocus manner on laser cladding of Fe-based alloy powder[J]. Surface & coatings technology, 2014, 248: 54-62.
- [66] LAI Q, ABRAHAMS R, YAN W, et al. Effects of preheating and carbon dilution on material characteristics of laser-cladded hypereutectoid rail steels[J]. Materials science and engineering A, 2018, 712: 548-563.
- [67] LAI Q, ABRAHAMS R, YAN W, et al. Investigation of a novel functionally graded material for the repair of premium hypereutectoid rails using laser cladding technology[J]. Composites part B: Engineering, 2017, 130: 174-191.
- [68] LAI Q, ABRAHAMS R, YAN W, et al. Influences of depositing materials, processing parameters and heating conditions on material characteristics of laser-cladded hypereutectoid rails[J]. Journal of materials processing technology, 2019, 263: 1-20.
- [69] WANG S Y, SUN Y Z, LI J B, et al. The effect of scanning power on AISI 434L stainless steel-based composite laser cladding coatings[J]. Advanced materials research, 2015, 1095: 636-640.
- [70] 张若宾, 张瑞乾, 陈勇, 等. 激光熔覆铁基合金单道成形工艺参数的研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(22): 162-165.
- ZHANG Ruo-bin, ZHANG Rui-qian, CHEN Yong, et al. Study on single pass forming process parameters of laser cladding iron-based alloy[J]. Hot working technology, 2017, 46(22): 162-165.
- [71] SAEIDI K, KEVETKOVA L, LOFAJ F, et al. Novel ferritic stainless steel formed by laser melting from duplex stainless steel powder with advanced mechanical properties and high ductility[J]. Materials science and engineering A, 2016, 665: 59-65.
- [72] 王程锦, 梁京, 陈岁元, 等. 激光直接沉积成形 15Cr21Ni7-xMo 不锈钢显微组织及性能研究[J]. 应用激光, 2017, 37(1): 11-16.
- WANG Cheng-jin, LIANG Jing, CHEN Sui-yuan, et al. Study on microstructures and properties of direct laser deposited 15Cr21Ni7-xMo stainless steels[J]. Applied laser, 2017, 37(1): 11-16.
- [73] 靳鸣, 贺定勇, 王曾洁, 等. 激光熔覆 2205 双相不锈钢/TiC 复合涂层的显微组织与性能[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 291-296.
- JIN Ming, HE Ding-yong, WANG Zeng-jie, et al. Microstructure and properties of laser cladded 2205 dual-phase stainless steel/TiC composite coatings[J]. Laser and optoelectronics progress, 2018, 55(11): 291-296.
- [74] 刘正东, 程世长, 包汉生, 等. 高铬马氏体耐热钢中 δ 铁素体形成及影响因素[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(11): 61-67.
- LIU Zheng-dong, CHENG Shi-chang, BAO Han-sheng, et al. Formation and influence factors of δ ferrite in high Cr martensitic heat resistant steel[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2010, 31(11): 61-67.