

高压柱塞高速激光熔覆镍基合金 涂层组织和耐磨性

李朝晖, 李美艳, 韩彬, 李格, 王治中, 孙深振

(中国石油大学(华东) 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266000)

摘要: **目的** 通过高速激光熔覆技术改善高压柱塞镍基合金涂层的组织, 并提高涂层的耐磨性能。**方法** 分别采用常规激光熔覆 ($P=1.8\text{ kW}$, $v_s=500\text{ mm/min}$) 和高速激光熔覆 ($P=1.8\text{ kW}$, $v_s=7000\text{ mm/min}$), 在高压柱塞 45# 钢材上制备了 SD-Ni45 耐磨涂层, 分别测试了两种涂层的稀释率、微观结构、硬度, 并通过可控气氛微型摩擦磨损试验仪和扫描电镜, 对熔覆层的耐磨性进行了分析。**结果** 高速激光熔覆层的稀释率约为常规激光熔覆层的 68%。高速激光熔覆层的物相与常规激光熔覆层的物相基本相同, 并无新的物相析出, 主要包括 $\gamma\text{-(Ni,Fe)}$ 固溶体、 Cr-Ni-Fe 固溶体、 Cr_{23}C_6 以及少量的 WC 等强化相, 但高速激光熔覆层的整体组织更加细小致密, 硬质相颗粒分布更为均匀。高速激光熔覆层与常规激光熔覆层的平均显微硬度分别为 $600\text{HV}_{0.1}$ 、 $460\text{HV}_{0.1}$, 高速激光熔覆层与常规激光熔覆层的磨痕宽度分别为 210 、 $315\text{ }\mu\text{m}$, 磨损量分别为 (7.4 ± 0.8) 、 $(4.4\pm 0.6)\text{ mg}$, 高速激光熔覆层的耐磨性相对于常规激光熔覆层提高了约 1.7 倍。**结论** 高速激光熔覆技术可以有效地改善常规激光熔覆层裂纹敏感性大、稀释率较高、涂层较厚等缺陷, 高速激光熔覆层的硬度和耐磨性较普通激光熔覆层有所提高。

关键词: 激光熔覆; 高速激光熔覆; 镍基合金; 稀释率; 微观结构; 耐磨性

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0045-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.005

High-pressure Plunger High-speed Laser Cladding Nickel-based Alloy Coating Structure and Wear Resistance

LI Zhao-hui, LI Mei-yan, HAN Bin, LI Ge, WANG Zhi-zhong, SUN Shen-zhen

(School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266000, China)

ABSTRACT: Although laser cladding coating has high binding strength, fine grain and high hardness, its low cladding efficiency, high crack sensitivity and high powder consumption seriously limit its wide application in industry. To solve this problem, researchers put forward high speed laser cladding and ultra-fast laser cladding method, through high-speed improve

收稿日期: 2020-08-19; 修订日期: 2020-09-23

Received: 2020-08-19; Revised: 2020-09-23

基金项目: 中石油重大科技项目 (ZD2019-184-004); 中央高校基本科研业务费资助 (20CX05009A); 山东省重点研发计划 (2019GGX102052)

Fund: Supported by the Major Scientific and Technological Projects of CNPC under Grant (ZD2019-184-004), the Fundamental Research Funds for the Central University (20CX05009A), Key Research and Development Plan of Shandong Province (2019GGX102052)

作者简介: 李朝晖 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属表面失效。

Biography: LI Zhao-hui (1998—), Male, Master, Research focus: metal failure and surface engineering.

通讯作者: 韩彬 (1974—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向金属失效及表面工程、新材料焊接技术。邮箱: hanbin@upc.edu.cn

Corresponding author: HAN Bin (1974—), Male, Doctor, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: metal failure and surface engineering, new material welding technology. E-mail: hanbin@upc.edu.cn

引文格式: 李朝晖, 李美艳, 韩彬, 等. 高压柱塞高速激光熔覆镍基合金涂层组织和耐磨性[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 45-54.

LI Zhao-hui, LI Mei-yan, HAN Bin, et al. High-pressure plunger high-speed laser cladding nickel-based alloy coating structure and wear resistance[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 45-54.

nickel-based alloy laser cladding coating and improve wear resistance coating. Methods the wear resistant coating of SD-Ni45 on High-pressure plunger is prepared using Conventional Laser Cladding (CLA) ($P=1.8$ kW, $v_s=500$ mm/min) and High-speed Laser Cladding (HLA) ($P=1.8$ kW, $v_s=7000$ mm/min). The dilution rate, microstructure and hardness of the two coatings were measured, and the wear resistance of the cladding layer was analyzed by micro-friction and wear tester with controlled atmosphere and scanning electron microscope. The dilution rate of high speed laser cladding layer is about 68% of that of conventional laser cladding layer. The phase of high-speed laser cladding layer is basically the same as that of conventional laser cladding layer, and there is no new phase precipitation, mainly including γ -(Ni,Fe) solid solution, Cr-Ni-Fe solid solution, Cr_{23}C_6 and a small amount of WC and other strengthened phases. However, the overall structure of high-speed laser cladding layer is finer and the distribution of hard particles is more uniform. The microhardness of high-speed laser cladding layer and conventional laser cladding layer are $600\text{HV}_{0.1}$ and $460\text{HV}_{0.1}$ respectively. The wear width of the high-speed laser cladding layer and the conventional laser cladding layer are $210\text{ }\mu\text{m}$ and $315\text{ }\mu\text{m}$ respectively, and the wear loss is $(7.4\pm 0.8)\text{ mg}$ and $(4.4\pm 0.6)\text{ mg}$ respectively. The wear resistance of the high-speed laser cladding layer is about 1.7 times higher than that of the conventional laser cladding layer. The high-speed laser cladding technology can effectively improve the crack sensitivity, high dilution rate and thick coating of conventional laser cladding layer, and the hardness and wear resistance of high-speed laser cladding layer are improved compared with conventional laser cladding layer.

KEY WORDS: laser cladding; high speed laser cladding; nickel base alloy; the dilution rate; microstructure; wear resistance

高压柱塞通常应用于油田水力柱塞泵的配套地面泵以及石油矿场的注水工程,也可应用在其他工业部门的水利工程及产生油压动力的机械设备中。高压柱塞通常在大于 24 MPa 的压力下工作,特殊工况下可达 100 MPa ,介质排量通常保持在 $300\sim 500\text{ L/min}$,往复运动频率可达 $300\sim 400\text{ min}^{-1}$ [1-3]。因此,柱塞通常在极恶劣的腐蚀磨损工况下工作,这就要求柱塞工作表面具有良好的耐磨性能 [4]。目前高压柱塞耐磨涂层的制备工艺主要为电镀硬铬、激光熔覆、热喷涂以及堆焊等。电镀铬涂层成本较低,具有良好的耐磨耐腐蚀性,但镀铬工艺使用的是六价铬离子,毒性大,对环境污染严重,并且涂层与基体的结合强度低 [5]。随着表面工程技术的发展,激光熔覆被认为是可代替电镀硬铬的有效方法,张磊 [6] 和陈坚 [7] 通过激光熔覆技术与电镀硬铬技术制备了镍基合金涂层,并发现激光熔覆镍基合金涂层的耐蚀性要优于电镀铬涂层。激光熔覆涂层虽然具有结合强度高、晶粒细小、硬度较高等特点,但其熔覆效率低,裂纹敏感性较大,粉末消耗多,其在工业中的广泛应用受到了严重的限制。

相对于常规激光熔覆,高速激光熔覆解决了能量利用率低、对基体热影响大以及熔覆层较厚等问题。2016年,德国亚琛工业大学和弗朗恩霍夫激光技术研究所提出了可替代电镀铬和热喷涂技术的超高速激光熔覆技术 [8-9],该技术在 3 kW 的激光功率下可获得稀释率 $<1\%$ 、厚度为 $10\sim 250\text{ }\mu\text{m}$ 且具有冶金结合特性的涂层,熔覆速度可达 200 m/min ,熔覆效率为 $500\text{ cm}^2/\text{min}$ [9]。有关高速激光熔覆及超高速激光熔覆的工艺参数以及力学性能已成为近些年来研究的热点,Thomas Schopphoven 等 [5] 研究了利用超高速激光熔覆技术熔覆了 Inconel625 涂层,并探究了工艺参数(激光功率、沉积速度、粉末质量流量、载气流速以

及层厚)对 Inconel625 熔覆层的影响,得到了一种新的 Inconel625 熔覆方法。李岩等 [9] 利用高速激光熔覆铁基合金涂层,并模拟探究了激光路径与送粉轨迹的耦合关系,分析了高速激光熔覆层的宏观形貌与微观结构。Andres Gasser、Zhong 等 [10-11] 使用混合工艺参数方法进行高沉积率激光金属沉积 Inconel718 合金,进行了粉末制备工艺、效率工艺窗口、降低孔隙率、微观结构和拉伸性能等方面的研究。此外,西北工业大学与该研究所合作开展了热处理对高速沉积 Inconel718 合金微观组织和拉伸性能的影响研究 [12]。波兰学者 Adam Dworak [13] 通过超高速激光熔覆 Stellite6 功能涂层,探究涂层质量受工艺参数的影响规律。

目前对于高速激光熔覆的研究主要关注于熔覆工艺、涂层质量和力学性能,对于高速激光熔覆层耐磨耐蚀性能的研究较少,且目前高速激光熔覆大都采用较为成熟的商用自熔性合金粉末。本文以压裂泵高压柱塞常用的 45#钢作为基体材料,采用常规激光熔覆(Conventional Laser Cladding,简称 CLA)和高速激光熔覆(High-speed Laser Cladding,简称 HLA)分别熔覆自制的 SD-Ni45 耐磨涂层,分析了两种涂层的微观结构,通过摩擦磨损实验测定了两种涂层的耐磨性能,并深入讨论了组织与耐磨性的关系,探究了高速激光熔覆镍基合金涂层的磨损机理。

1 试验

1.1 涂层的制备

本次试验选用的基体材料为机械性能较好的 45#钢,其主要成分如表 1 所示。将 45#钢按照 $100\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的规格进行切割,利用手砂轮将其表面进行打磨,去除锈迹和油迹直至露出金属光泽,最

后用酒精将表面清洗一遍。将清洗好的基板烘干，封装待用。

熔覆粉末选用自制的 SD-Ni45 粉末。粉末粒径为 48~100 μm，其微观形貌如图 1 所示，化学成分如

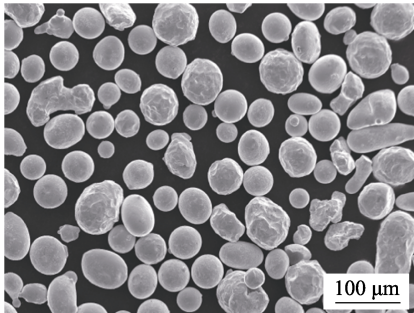


图 1 SD-Ni45 合金粉末的微观形貌
Fig.1 Micro morphology of SD-Ni45 alloy powder

表 1 SD-Ni45 合金粉末和 45#钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of SD-Ni45 alloy powder and 45# matrix

Samples	wt. %											
	C	Cr	Si	Fe	Ni	Mo	Al	Mn	B	WC	S	P
SD-Ni45	0.64	13.74	2.72	15.14	49.1	0.46	0.008	0.04	2.16	16	—	—
45# steel	0.42	≤0.25	0.17~0.37	Bal.	≤0.25	—	—	0.5~0.8	—	—	0.035	0.035

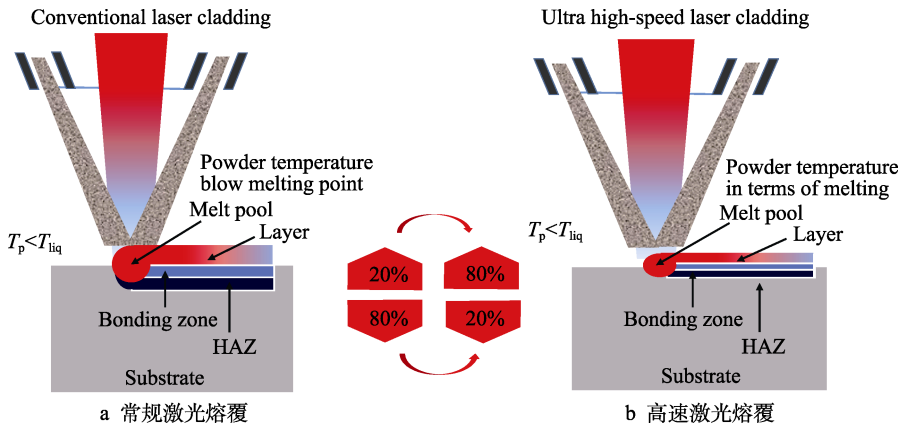


图 2 工作原理示意图
Fig.2 Working principle diagram: (a) conventional laser cladding, (b)high-speed laser cladding

表 2 高速激光熔覆及常规激光熔覆的工艺参数
Tab.2 Technological parameters of high-speed laser cladding and conventional laser cladding

Process method	Power /kW	Linear velocity /(m·min ⁻¹)	Overlap rate/%	Carrier gas /(L·min ⁻¹)	Spot diameter /mm
CLA	1800	0.5	75	6	2
HLA	1800	7	75	6	2

1.2 性能测试

将熔覆层采用 LC-150 型精密金相切割机切割成尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的试样，经打磨、抛光后在蔡司显微镜下观察熔池形貌，并测量熔覆层稀释

率，使用行星式球磨机将粉末混合均匀，激光熔覆前将粉末置于 200 °C 烘干炉中烘烤 1 h。

本次实验分别采用 ZKZM-4000 高速激光器和 IPJ YLS-6000 光纤激光器，工作原理示意如图 2 所示，常规激光熔覆是利用高能量激光束同时熔化基体材料和粉末形成熔池，但熔池的温度高于粉末颗粒的温度 ($T_{liq} > T_p$)，基体吸收较多的能量 (图 2a)。而高速激光熔覆采用同步送粉法，将粉末颗粒加热到接近熔化温度，然后高速喷射到基体表面，与基体的熔池短暂接触后形成极薄的冶金层，通过相对于激光辐射移动工件，可得到几乎 100% 的冶金结合。熔池温度与粉末颗粒温度基本相同 ($T_{liq} \approx T_p$)，基体吸收较少的能量，这既增大了熔覆速度又有助于降低涂层厚度和热影响区尺寸 (图 2b) [9,14]。两种激光熔覆的工艺参数见表 2。

率，使用王水对样品腐蚀后，使用 JEOL 型扫描电子显微镜 (SEM/EDS) 观察熔覆层截面显微组织形貌，采用 X'Pert PRO MPD X-射线衍射仪对样品的物相进行测定，测试条件为 CuKα 靶，测量角度为 20°~100°，扫描速度为 0.3 (°)/min。使用 HV-1000 型数字显微硬度计对熔覆层截面的显微硬度进行测试，加载载荷为 100 g，保载时间为 15 s。摩擦磨损实验采用 WTM-2E 型可控气氛微型摩擦磨损试验机测试熔覆层的耐磨性，对磨材料为 GCr15 轴承钢，磨球半径为 3 mm，法向载荷为 800 g，电机转速为 500 r/min，在室温下以干摩擦的形式磨损 30 min，测定材料的摩擦系数，并采用 BSA124S 型分析天平 (天平精度为 0.1 mg) 记录实验前后试样及对磨球的质量。

2 结果及分析

2.1 熔覆层宏观形貌

图3为两种激光熔覆层表面成形性及探伤情况。由图3可以观察到,常规激光熔覆层表面较为粗糙,有较多凸起与凹陷,经表面探伤后可观察到有大量垂直于扫描速度的横向裂纹;高速激光熔覆层表面熔渣较少,无气孔等缺陷,经表面探伤后无裂纹产生,涂

层整体成形性较好。这是由于高速激光熔覆热输入量小,能够快速达到激光熔覆的最小比能,降低了熔覆层裂纹敏感性。

图4为激光熔覆层横截面示意图及熔池形貌,稀释率可通过横截面面积测量值的比值计算,式(1)为熔覆层稀释率的计算公式,其中 η 为熔覆层的稀释率, h 为基体的熔深, H 为熔覆层的高度^[12]。

$$\eta = \left(\frac{h}{h+H} \right) \times 100\% \quad (1)$$

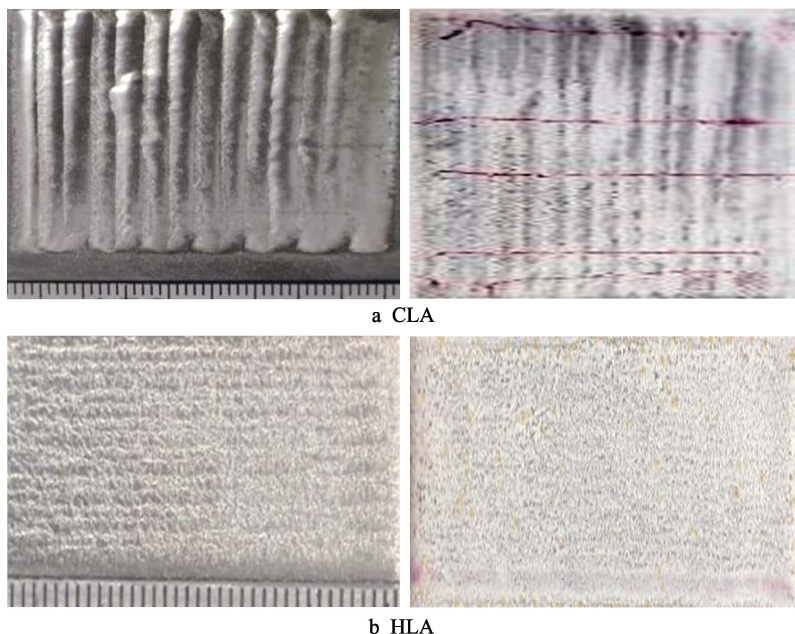


图3 熔覆层的宏观形貌及表面探伤

Fig.3 Macro morphology and surface detection of cladding layer

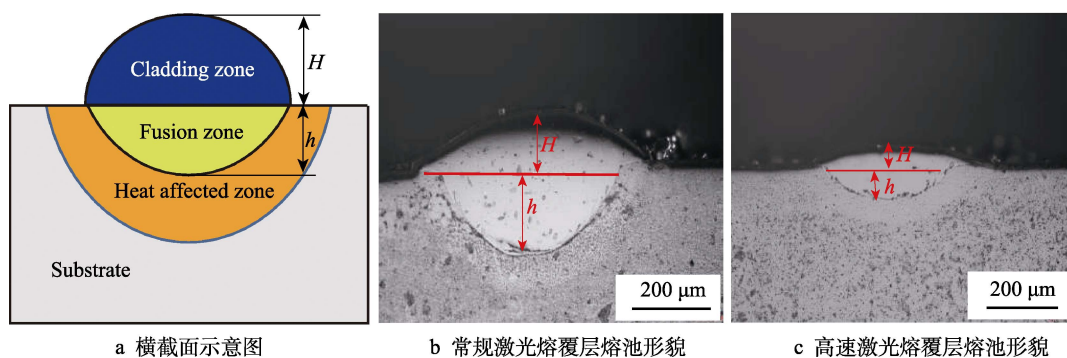


图4 单道熔覆层横截面示意图及熔池形貌

Fig. 4 cross section diagram of single cladding layer and weld pool morphology: (a) cross section diagram, (b) conventional laser cladding pool morphology, (c) high-speed laser cladding pool morphology

由图4可观察到两种涂层均致密,熔覆层的性能受稀释率大小的影响。稀释率太大,熔覆层性能变差;稀释率太小,熔覆层与基体不能形成良好的冶金结合。两种熔覆层稀释率的计算结果见表3,常规激光熔覆层的稀释率较高,约为53.75%,而高速激光熔覆层的稀释率约为37.03%,明显低于常规激光熔覆层,这是由于高速激光熔覆过程仅少部分激光能量透过粉末并作用于基体^[15-16],使得粉末进入母材的含量减少,降低了熔覆层的稀释率。

表3 熔覆层稀释率计算结果

Tab.3 Calculation results of cladding layer dilution rate

Cladding layer	Matrix penetration $h/\mu\text{m}$	Height of cladding layer $H/\mu\text{m}$	Penetration depth + cladding layer height $(h+H)/\mu\text{m}$	Dilution rate/%
CLA	180	154	334	53.89
HLA	50	85	135	37.03

2.2 微观组织分析

图 5 为高速激光熔覆层的截面微观形貌。图 5a、b 为熔覆层底部显微组织，熔覆层底部组织多以平面晶的形式生长，在临近基体结合处，组织多为粗大的树枝晶，其生长方向大致倾向于与结合界面垂直，这是由于在熔覆层底部热量主要通过垂直于基体结合界面的方向散失^[17]。图 5c、d 为熔覆层中部显微组织，可观察到熔覆层中部的显微组织主要由形状不规则的转向树枝晶和形状规则的棒状树枝晶组成。相对于熔覆层底部，此区域组织的晶粒尺寸明显变小，并且

更加均匀细密。这是由于热量的积累，散热逐渐减慢，且随着凝固过程的进行，凝固速度不断增大，温度梯度不断变小，成分过冷逐渐增大，促使显微组织由柱状树枝晶向晶粒尺寸更细小的树枝晶转变。图 5e、f 为熔覆层上部显微组织，可观察到熔覆层上部显微组织多为均匀、细小的等轴树枝晶^[18-19]，晶粒尺寸相对于底部与中部的熔覆层尺寸更细小，这是由于熔覆层上部更易与外部空气接触，热量流失加快，成分过冷区加宽，促使熔覆层上部形成了细小的等轴树枝晶。

常规激光熔覆层的截面显微组织如图 6 所示。

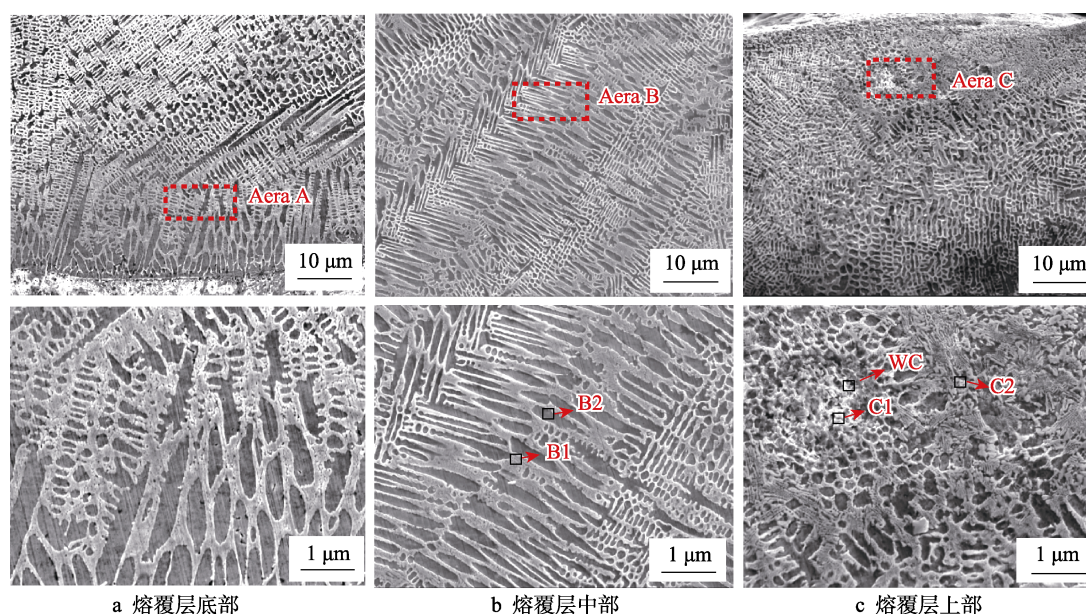


图 5 高速激光熔覆层的截面显微组织

Fig.5 The microstructure of the cross-section of high-speed laser cladding: (a) bottom of cladding layer, (b) middle of cladding layer, (c) upper part of cladding layer

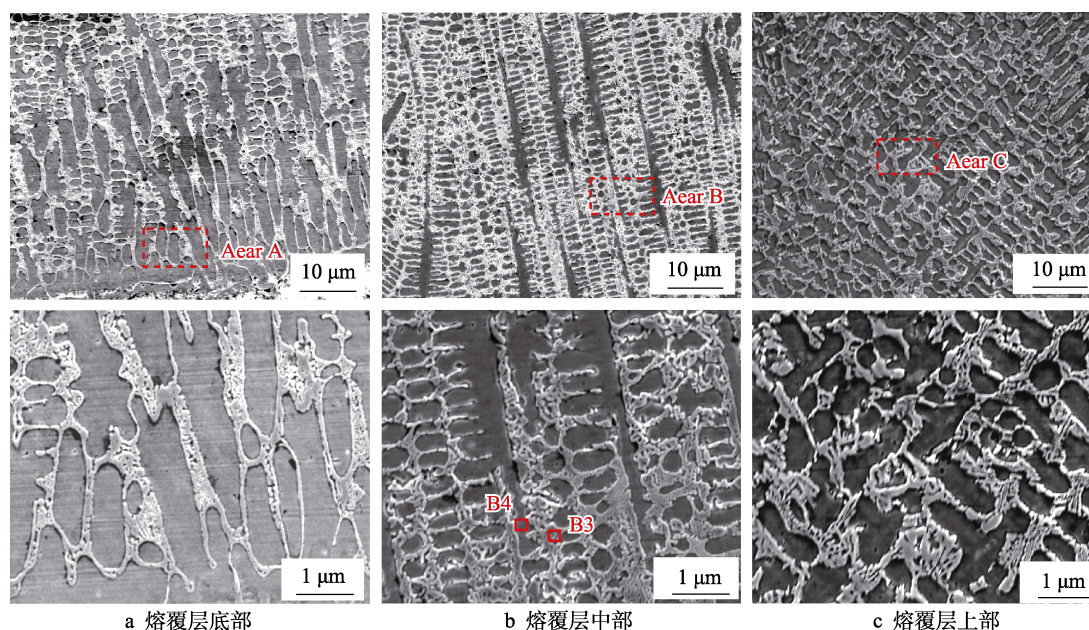


图 6 常规激光熔覆层的截面显微组织

Fig.6 The microstructure of the conventional laser cladding section: (a) bottom of cladding layer, (b) middle of cladding layer, (c) upper part of cladding layer

图 6a、b 为熔覆层底部微观组织，可以观察到相对于高速激光熔覆层底部组织形貌，整体涂层较为粗大，且粗大的树枝晶生长方向不均匀。图 6c、d 为熔覆层中部微观组织，主要由生长方向趋于一致、形状规则的棒状树枝晶组成。图 6e、f 为熔覆层上部微观形貌，可观察到顶部组织生长方向由于散热方式的改变，组织形态也发生变化，晶粒尺寸相对于底部和中部的组织变得更细小，主要由晶粒尺寸较小的等轴晶组成，但常规激光熔覆涂层相对于高速激光熔覆涂层，其组织整体较为粗大。

表 4 为高速激光熔覆层与常规激光熔覆层中各点成分的质量百分比，根据表 4 可知，B1 点的 Ni 元素相对于 B2 点较少，Cr、W 元素相对于 B2 点较多，说明高速激光熔覆层中部晶界处贫 Ni，且 Cr、W 元素在晶界处析出。C1 点相对于 C2 点，C、W 元素明显增多，且原子比接近于 1:1，可知在高速激光熔

表 4 高速激光熔覆层与常规激光熔覆层各点成分含量
Tab.4 Mass percentage of each point of high-speed laser cladding layer and conventional laser cladding layer

Point	Ni	Fe	Cr	C	W	Si
B1	11.03	42.30	19.77	20.66	5.38	0.85
B2	24.04	39.07	14.05	16.48	5.02	1.34
C1	25.56	22.34	15.77	19.00	15.94	1.06
C2	27.38	36.33	12.20	18.99	3.29	1.81
B3	24.31	43.40	15.10	11.41	4.50	1.28
B4	26.85	43.86	13.10	11.55	3.90	0.74

覆层上部存在 WC 颗粒硬质相。B3、B4 点相对于 B1、B2 点，C、Cr、W 元素减少，这是由于在常规激光熔覆过程中，由于熔覆速度较慢，且熔覆层的稀释率较大，导致 Cr、W 元素损失较多。

图 7 为高速激光熔覆层的面扫示意图。从图 7a

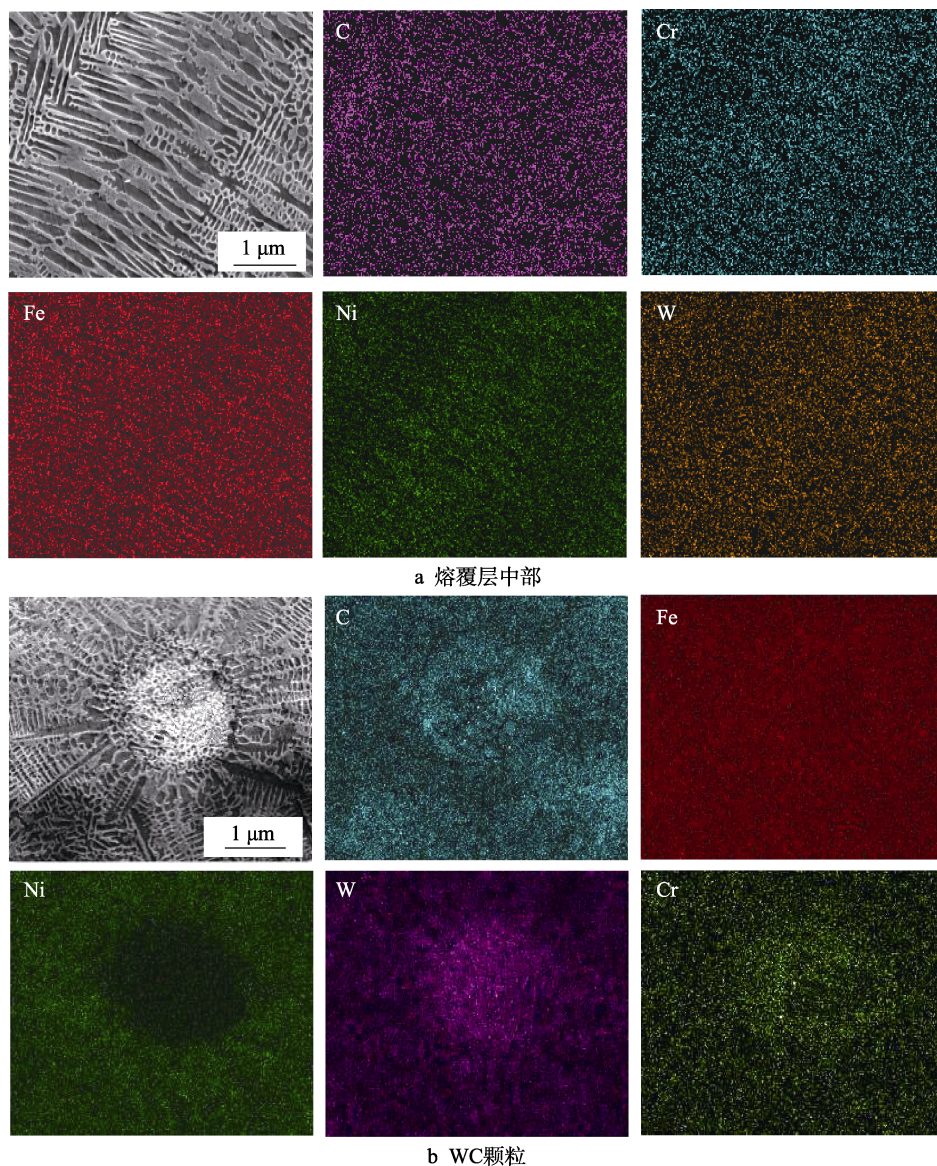


图 7 高速激光熔覆层的面扫描图

Fig.7 Scanning of high-speed laser cladding layer: (a) the middle part of the cladding layer (b) WC particles

中可观察到, 熔覆层中部 Ni、Cr 元素在晶界处存在偏析, C、W 元素分布较为均匀; 图 7b 中可以观察到, 熔覆层上部 C、W 元素发生偏聚, 可知此处存在 WC 颗粒硬质相。

2.3 熔覆层物相分析

图 8 为两种熔覆层的 XRD 示意图。由图 8 可知, 高速激光熔覆层与常规激光熔覆层的物相主要由 FCC 相组成的 γ -(Ni,Fe) 固溶体为主, 还存在 Cr-Ni-Fe 固溶体、 Cr_{23}C_6 以及少量的 WC 等强化相, 高速激光熔覆层并未有新的物相析出。

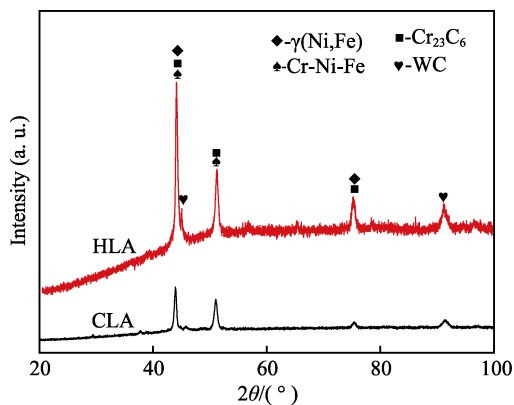


图 8 熔覆层的 XRD 图谱
Fig.8 The XRD pattern of the cladding layer

由 Debye-Scherrer 公式(2)可知, 如果晶粒的尺寸越小, 则衍射峰半高宽越大, 随之造成宽化现象。半高宽的影响因素包括位错密度、应力状态、晶粒尺寸等^[20]。其中, D 代表晶粒尺寸; B 代表衍射峰的半高宽; K 为常数, 通常可近似取 1; λ 为 X 射线波长, 为 0.154 056 nm; θ 代表晶面布拉格衍射角。

$$D = \frac{K\lambda}{B\cos\theta} \quad (2)$$

高速激光熔覆层相对于常规激光熔覆层, 其半高增大, 带入公式(2)可知, 高速激光熔覆层的平均晶粒尺寸由常规激光熔覆层的 22 nm 减小至 3.75 nm。

2.4 显微硬度测试

图 9 为常规激光熔覆层与高速激光熔覆层的显微硬度分布图, 可以看出常规激光熔覆层的硬度波动较大, 熔覆层的平均硬度为 460HV_{0.1}, 高速激光熔覆层的显微硬度波动较小, 分布较为均匀, 平均硬度为 600HV_{0.1}, 高速激光熔覆层的硬度相对于常规激光熔覆层提高了 1.3 倍。这是由于高速激光熔覆层中固溶体和碳化物的分布比较均匀, 根据 Hall-Patch 公式可知, 晶粒的尺寸越小, 材料的强度越高, 熔覆速度的提高对涂层内的组织存在较为明显的细化作用, 晶界产生的碳化物和晶内的析出物起到第二相强化的作用, 均有助于熔覆层硬度的提升, 并且高速激光熔覆

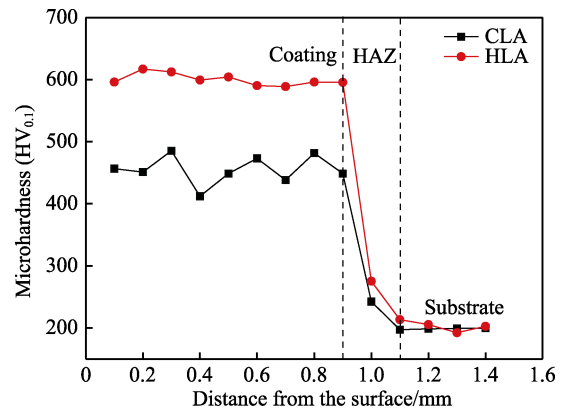


图 9 熔覆层显微硬度分布图
Fig.9 Microhardness distribution diagram of cladding layer

的热输入小, 母材受热循环的影响减小, 母材的软化现象较常规激光熔覆有所减缓。

2.5 耐磨性测试

图 10 为常规激光熔覆层与高速激光熔覆层的干摩擦系数-时间曲线。由图 10 可以看出, 整个摩擦磨损过程中分为磨合磨损期与稳定磨损期, 在磨损初期两种熔覆层的摩擦系数波动较大, 这是由于在磨损初期, 样品与对磨环的接触面积较小, 接触应力较大, 摩擦系数快速增大, 之后接触应力不断减小, 摩擦系数随之趋于稳定^[21]。常规激光熔覆涂层的摩擦系数约为 0.566, 且波动较大; 而高速激光熔覆涂层的摩擦系数约为 0.409, 且在整个摩擦磨损过程中波动较小, 曲线较为平稳。

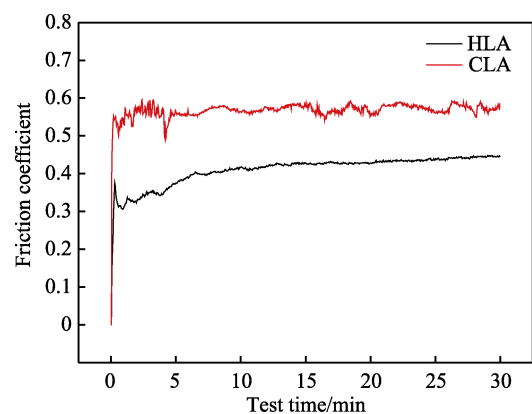


图 10 熔覆层的干摩擦系数曲线图
Fig.10 Dry friction coefficient curve of cladding layer

图 11 为两种涂层的磨损量及磨损率, 磨损率 ω 的计算公式见公式(3), 其中, m 为样品的质量损失, d 为对磨球的直径, n 为对磨球转的圈数。

$$\omega = \frac{m}{\pi \cdot d \cdot n} \quad (3)$$

由图 11 可看出, 常规激光熔覆涂层与高速激光熔覆涂层的平均质量损失量分别为 (7.4 ± 0.8) 、 (4.4 ± 0.6) mg, 对磨球的平均质量损失量分别为 (0.38 ± 0.05) 、

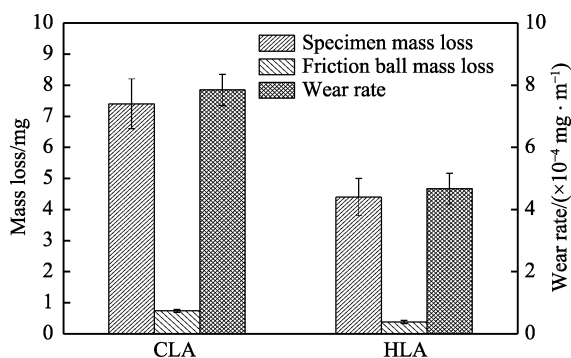


图 11 熔覆层的磨损量与磨损率
Fig.11 Wear loss and wear rate of cladding layer

(0.74 ± 0.05) mg, 磨损率分别为 $(7.85 \pm 0.53) \times 10^{-4}$ 、 $(4.67 \pm 0.46) \times 10^{-4} \text{ mg/m}$ 。可见高速激光熔覆涂层的耐磨性相对于常规激光熔覆层提高了约 1.7 倍, 这是由于在高速激光熔覆过程中, 因较快的熔覆速度使得晶粒尺寸减小, 晶粒内部产生的第二相强化作用增强, 并且在晶界和晶内形成大量硬质相, 硬质相颗粒分布也较为均匀, 在多种强化机制的共同作用下, 促使熔覆层的显微硬度提高, 使得表面原子在摩擦磨损时不

易发生滑移, 故耐磨性得到较大的提升^[22-23]。

图 12 为两种激光熔覆层磨损表面的 SEM 形貌。从图 12a、b 中可以看出, 高速激光熔覆层的磨痕较窄较浅, 磨痕宽度约为 $210 \mu\text{m}$, 磨损程度较轻, 其磨损形貌主要表现在表面存在一些细微的划痕和较少的磨屑, 磨屑呈层片状, 但尺寸较小, 剥落坑也相对较小, 磨损机制为疲劳磨损。从图 12c、d 可以看出, 常规激光熔覆层的磨痕较宽较深, 磨痕宽度约为 $315 \mu\text{m}$, 其磨损形貌主要表现为较大块的剥落坑且磨损表面出现了清晰可见的与磨屑方向平行的犁沟, 磨损机制为磨粒磨损与疲劳磨损^[20,22]。表 5 为两种激光熔覆层磨损形貌各点成分质量百分比, b1、b2 处的 O 含量分别为 8.7% 和 2.5%, 可知在磨损过程中生成少量氧化物。d1、d2 处的 O 含量分别为 12.95% 和 8.45%, 较 b1、b2 点, O 含量增多, 生成了较多的氧化物, 可见高速激光熔覆层的耐磨性能要优于常规激光熔覆层^[24-25]。这是由于高速激光熔覆层的硬度较高, WC、 Cr_{23}C_6 等硬质相颗粒分布更加均匀, 起到了抗磨骨架的作用, 能够有效地抵御摩擦副小球表面凸峰对涂层产生的犁削作用, 形成的划痕较细, 耐磨性得到提高^[26]。

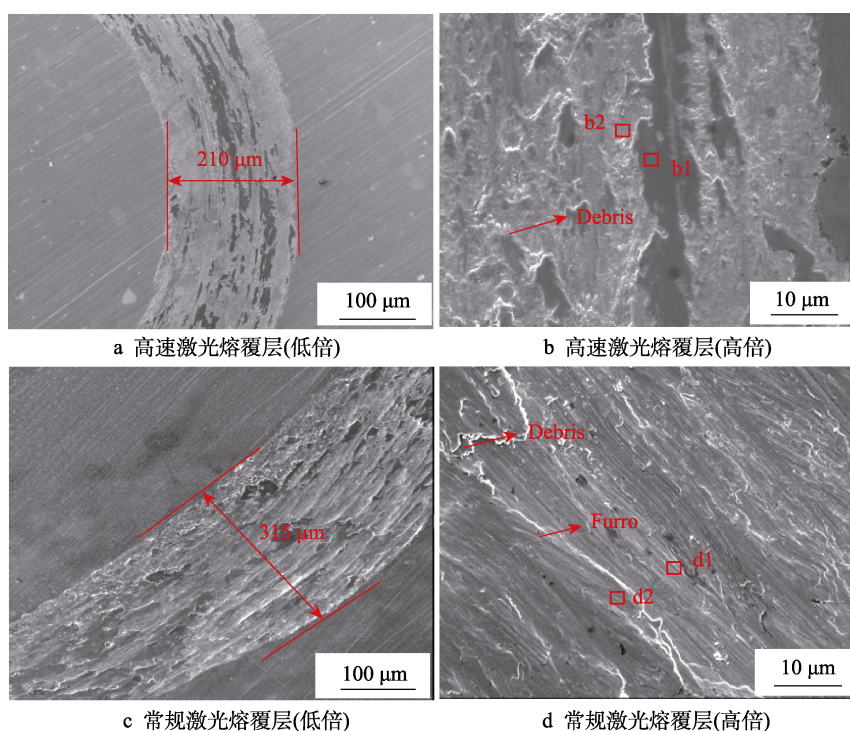


图 12 熔覆层的磨损形貌

Fig.12 wear morphology of cladding layer: (a) (b) high-speed laser cladding layer (c)(d) conventional laser cladding layer

表 5 高速激光熔覆层和常规激光熔覆层磨损形貌中各点成分含量

Tab.5 Mass percentage of components at each point in wear morphology of high-speed laser cladding layer and conventional laser cladding layer

								wt. %							
Point	Ni	Fe	Cr	O	Si	C	W	Point	Ni	Fe	Cr	O	Si	C	W
b1	34.80	34.03	10.80	8.70	1.50	5.97	4.20	d1	22.41	45.19	9.72	12.95	1.29	4.61	3.83
b2	32.60	40.07	10.90	2.50	1.80	8.63	3.50	d2	36.69	37.72	7.86	8.45	1.16	4.90	3.22

3 结论

1) 采用高速激光熔覆与常规激光熔覆技术在压裂泵高压柱塞 45#钢基体上熔覆 SD-Ni45 涂层, 相对于常规激光熔覆涂层, 高速激光熔覆涂层表面光亮, 熔渣较少, 无气孔、裂纹等缺陷, 稀释率也有所降低。

2) 常规激光熔覆涂层的组织相对粗大, 高速激光熔覆涂层的整体组织较为致密、细小, 无明显元素偏析现象, 涂层中 Cr、W 元素含量增加, 所形成的硬质相颗粒增多且分布均匀, 使得涂层的显微硬度得到提高。

3) 高速激光熔覆层与普通激光熔覆层的物相大致相同, 主要以 γ -(Fe,Ni) 固溶体为主, 还有 Cr-Ni-Fe 固溶体、 Cr_{23}C_6 以及少量的 WC 等强化相。但晶粒尺寸由常规激光熔覆层的 22 nm 减小至 3.75 nm。

4) 高速激光熔覆层的耐磨性得到明显加强, 耐磨性相对于常规激光熔覆涂层提高了约 1.7 倍, 摩擦系数约为常规激光熔覆涂层的 72%, 熔覆层的磨痕较窄较浅, 磨损率较小, 其磨损机制为疲劳磨损; 常规激光熔覆层的磨痕较宽, 有明显的平行于磨屑方向的犁沟, 磨损率较大, 磨损机制为磨粒磨损与疲劳磨损。

参考文献:

- [1] 田奎, 李雄, 陈守成. 压裂泵柱塞失效模式分析与改进应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2012, 9(8): 110-111.
TIAN Kui, LI Xiong, CHEN Shou-cheng. Failure mode analysis and Improvement application of fracturing pump plunger[J]. Journal of Changjiang University(natural science edition), 2012, 9(8): 110-111.
- [2] 徐栋. 3W-1B 型高压泵柱塞表面工艺改造[J]. 铝加工, 2015(2): 50-52.
XU Dong. Surface process modification of 3W-1B high pressure pump plunger[J]. Aluminium processing, 2015 (2): 50-52.
- [3] 钱晖, 丁希军, 马建忠. 激光熔覆金属陶瓷柱塞的研制[J]. 石油机械, 2000(12): 17-18.
QIAN Hui, DING Xi-jun, MA Jian-zhong. Development of laser cladding cermet plunger[J]. Petroleum machinery, 2000(12): 17-18.
- [4] 廖心同. 6500HP 型压裂泵柱塞密封结构与性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
LIAO Xin-tong. Study on the structure and performance of plunger seal of 6500HP fracturing pump[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [5] SCHOPPHOVEN T, GASSER A, WISSENBAACH K, et al. Investigations on ultra high speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying[J]. Journal of laser applications, 2016, 28(2): 022501.
- [6] 张磊, 陈小明, 张凯, 等. 沿海水闸活塞杆表面激光熔覆 Ni 基涂层组织及其抗磨耐蚀性能[J]. 材料保护, 2019, 52(11): 17-22.
ZHANG Lei, CHEN Xiao-ming, ZHANG Kai, et al. Structure and wear resistance of laser cladding Ni-based coating on piston rod of coastal sluice[J]. Materials protection, 2019, 52(11): 17-22.
- [7] 陈坚, 胡碧康, 吴贺利, 等. 激光熔覆铁基合金粉末的组织及耐腐蚀性能[J]. 材料保护, 2019, 52(12): 150-153.
CHEN Jian, HU Bi-kang, WU He-li, et al. Microstructure and corrosion resistance of laser cladding iron-based alloy powder[J]. Materials protection, 2019, 52(12): 150-153.
- [8] 朱胜, 张垚, 王晓明, 等. 扫描速度对激光熔覆 Al 基非晶复合层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 136-142.
ZHU Sheng, ZHANG Yao, WANG Xiao-ming, et al. The effect of scanning speed on structure and performance of Al-based amorphous composite by laser cladding[J]. Surface technology, 2016, 45(7): 136-142.
- [9] 李岩, 白瑞兴, 姜丽艳, 等. 1.8 kW 高速激光熔覆铁基合金工艺与组织结构[C]//第二十一届中国热喷涂研讨会暨第二十二届全国热喷涂年会. 天津: [s. n.], 2018: 77-82.
LI Yan, BAI Rui-xing, LOU Li-yan, et al. Process and structure of 1.8 kW high-speed laser cladding iron-based alloy[C]//Proceedings of the 21st international thermal spraying conference and the 22nd national thermal spraying annual conference. Tianjin: [s. n.], 2018: 77-82.
- [10] ZHONG Chen, GASSER A, KITTEL J, et al. Study of process window development for high deposition-rate laser material deposition by using mixed processing parameters[J]. Journal of laser applications, 2015, 27(3): 65-68.
- [11] ZHONG Chen, KITTEL J, GASSER As, et al. Study of nickel-based super-alloys Inconel 718 and Inconel 625 in high-deposition-rate laser metal deposition[J]. Optics and laser technology, 2019, 109: 352-360.
- [12] 李祚, 隋尚, 袁子豪. 高沉积率激光熔覆沉积 GH4169 合金的微观组织与拉伸性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102004.
LI Zuo, SUI Shang, YUAN Zi-hao. Microstructure and tensile properties of GH4169 alloy deposited by laser cladding with high deposition rate[J]. Chinese journal of lasers, 2019, 46(1): 0102004.
- [13] ADAM D, JAROSLAW S, PIOTR K, et al. Application of ultra high speed cladding technology for functional coatings deposition[J]. Surface and coatings technology, 2018, 34: 713.

- [14] ZHONG Chen, CHEN Jie, LINNENBRINK S, et al. A comparative study of Inconel 718 formed by high deposition rate laser metal deposition with GA powder and PREP powder[J]. *Materials & design*, 2016, 107: 386-392.
- [15] 娄丽艳, 李成新, 张煜, 等. 低功率超高速激光熔覆 FeCr 合金薄涂层微观结构与表面形貌演化[J]. *燕山大学学报*, 2020, 44(2): 116-124.
- LOU Li-Yan, LI Cheng-xin, ZHANG Yu, et al. Microstructures and surface morphologic evolution of FeCr alloy thin coating coated with low-power ultra-high speed laser cladding[J]. *Journal of Yanshan University*, 2020, 44(2): 116-124.
- [16] 张净宜, 邱长军, 贺沅玮, 等. 不同 Ni 含量铁基激光熔覆层组织和性能的研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(6): 221-225.
- ZHANG Jing-yi, QIU Chang-jun, HE Yuan-wei, et al. Microstructure and properties of Fe-based laser cladding with different Ni content[J]. *Surface technology*, 2017, 46(6): 221-225.
- [17] 李俐群, 申发明, 周远东, 等. 超高速激光熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性的对比[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 174-183.
- LI Li-qun, SHEN Fa-ming, ZHOU Yuan-dong, et al. Comparison of microstructure and corrosion resistance of ultra-high speed laser cladding and conventional laser cladding 431 stainless steel coating[J]. *Chinese journal of lasers*, 2019, 46(10): 174-183.
- [18] HEMMATI I, OCELIK V. Microstructural characterization of AISI 431 martensitic stainless steel laser-deposited coatings[J]. *Journal materials science*, 2011, 46(10): 3405-3414.
- [19] 何骅波, 杨梦梦, 黄晓波, 等. 螺杆钢表面不同激光熔覆层的耐磨与耐腐蚀性能[J]. *机械工程材料*, 2017, 41(10): 11-14.
- HE Hua-bo, YANG Meng-meng, HUANG Xiao-bo, et al. Wear resistance and corrosion resistance of laser cladding on screw steel[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2017, 41(10): 11-14.
- [20] 湛俊, 肖学军, 张黎. 纳米 WC 增强镍基复合涂层析出相及相成分研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35(5): 74-76.
- CHEN Jun, XIAO Xue-jun, ZHANG Li. Research on precipitated phase and phase composition of nano-WC enhanced nickel-based composite coating[J]. *Ordnance materials science and engineering*, 2012, 35(5): 74-76.
- [21] 金剑波, 赵宇, 赵淑珍, 等. TiN 含量对激光选区熔化成形钛基复合材料微结构与耐磨性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 186-193.
- JIN Jian-bo, ZHAO Yu, ZHAO Shu-zhen, et al. Effect of TiN content on microstructure and wear resistance of titanium matrix composites formed by laser selection fusion[J]. *Chinese journal of lasers*, 2019, 46(11): 186-193.
- [22] 赵宁, 陶礼, 郭辉, 等. 激光熔覆纳米 La_2O_3 添加镍基合金涂层的显微组织与耐磨性研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(8): 2092-2096.
- ZHAO Ning, TAO Li, GUO Hui, et al. Studies on microstructure and wear resistance of laser cladding nano- La_2O_3 with nickel-based alloy coating[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2017, 46(8): 2092-2096.
- [23] 赵淑珍, 金剑波, 谢敏, 等. 扫描速率对激光熔覆 Cu80Fe20 偏晶涂层组织与耐磨性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302005.
- ZHAO Shu-zhen, JIN Jian-bo, XIE Min, et al. Effect of scanning rate on microstructure and wear resistance of laser cladding Cu80Fe20 monocrystalline coating[J]. *Chinese journal of lasers*, 2019, 46(3): 0302005.
- [24] 刘兴光, 王勇, 韩彬. 激光熔覆 Ni 包 WC 复合涂层的组织、耐磨和耐蚀性分析及应用[J]. *电镀与涂饰*, 2011, 30(5): 72-75.
- LIU Xing-guang, WANG Yong, HAN Bin. Microstructure, abrasion and corrosion resistance analysis and application of laser cladding Ni coated WC composite coating[J]. *Electroplating & finishing*, 2011, 30(5): 72-75.
- [25] 赵健, 马冰, 刘光, 等. Ni 包 WC 含量对激光熔覆 Ni45/Ni-WC 复合涂层显微组织与性能的影响[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2018(4): 17-21.
- ZHAO Jian, MA Bing, LIU Guang, et al. Effect of the content of Ni cladding WC on the microstructure and properties of laser cladding Ni45/Ni-WC composite coating[J]. *Abstract of mechanical manufacturing(welding)*, 2018(4): 17-21.
- [26] 张德强, 张吉庆, 郭忠娟. 45# 钢表面激光熔覆自熔性镍基碳化钨粉末[J]. *表面技术*, 2015, 44(11): 66-70.
- ZHANG De-qiang, ZHANG Ji-qing, GUO Zhong-juan. Laser cladding of self-fluxing Ni-based WC powder on 45# steel surface[J]. *Surface technology*, 2015, 44(11): 66-70.