

激光熔覆CrMnFeCoNi高熵合金涂层在CL60钢表面的工艺优化与性能研究

王宇晴, 张 鹏

大连交通大学詹天佑学院(中车学院), 辽宁 大连

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月7日

摘 要

本研究旨在通过激光熔覆技术在CL60高碳钢表面制备CrMnFeCoNi高熵合金涂层, 优化工艺参数以达到最优涂层质量, 为能够提高车轮的表面强度、耐磨性和使用寿命, 以及为列车车轮的表面改性提供新的技术思路。本研究采用正交实验, 分析研究了激光功率、扫描速度和送粉速率对涂层质量的影响。通过宏观形貌、微观形貌、稀释率、成型系数和显微硬度等指标评估涂层的质量, 并利用极差分析确定最佳激光功率和送粉速率, 再通过变化扫描速度, 寻求最佳参数。实验结果表明, 激光功率对涂层稀释率和硬度影响最大, 扫描速度对成型系数影响显著。最佳工艺参数为激光功率1400 W、扫描速度4 mm/s、送粉速率20 g/min。在此参数下, 涂层的稀释率为15.5%, 成型系数为4.35, 显微硬度为181.25 HV_{0.5}, 且涂层组织致密, 无明显缺陷。涂层中晶粒组织沿着熔凝方向生长, 由底部到顶部从粗大的树枝晶、柱状晶向细小的致密的胞状晶过渡。本研究可以有效提高CL60钢表面高熵合金涂层的综合性能, 确定激光熔覆CrMnFeCoNi高熵合金涂层的最佳工艺参数, 为高碳钢基体的激光熔覆技术提供了理论依据和实验支持。

关键词

激光熔覆, 高熵合金, CL60钢, 工艺参数

Process Optimization and Performance Study of Laser Cladding CrMnFeCoNi High-Entropy Alloy Coating on CL60 Steel Surfaces

Yuqing Wang, Peng Zhang

Zhan Tianyou College (CRRC College) of Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Apr. 7th, 2025

文章引用: 王宇晴, 张鹏. 激光熔覆 CrMnFeCoNi 高熵合金涂层在 CL60 钢表面的工艺优化与性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(4): 562-575. DOI: 10.12677/ms.2025.154061

Abstract

This study aims to prepare CrMnFeCoNi high entropy alloy coating on the surface of CL60 high carbon steel through laser cladding technology, optimize process parameters to achieve optimal coating quality, and provide new technical ideas for improving the surface strength, wear resistance, and service life of wheels, as well as for surface modification of train wheels. This study used orthogonal experiments to analyze the effects of laser power, scanning speed, and powder feeding rate on coating quality. This study evaluates the quality of the coating through macroscopic morphology, microscopic morphology, dilution rate, molding coefficient, and microhardness indicators, and determine the optimal laser power and powder feeding rate using range analysis. Then, it seeks the best parameters by changing the scanning speed. The experimental results show that laser power has the greatest impact on the dilution rate and hardness of the coating, while scanning speed has a significant impact on the forming coefficient. The optimal process parameters are laser power of 1400 W, scanning speed of 4 mm/s, and powder feeding rate of 20 g/min. Under these parameters, the dilution rate of the coating is 15.5%, the forming coefficient is 4.35, the microhardness is 181.25 HV_{0.5}, and the coating structure is dense with no obvious defects. The grain structure in the coating grows along the melting direction, transitioning from coarse dendritic and columnar crystals to fine and dense cellular crystals from bottom to top. This study can effectively improve the comprehensive performance of high entropy alloy coatings on the surface of CL60 steel, determine the optimal process parameters for laser cladding CrMnFeCoNi high entropy alloy coatings, and provide theoretical basis and experimental support for laser cladding technology of high carbon steel substrates.

Keywords

Laser Cladding, High-Entropy Alloys, CL60 Steel, Process Parameters

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

CL60 钢是一种高碳钢, 具有高强度、高硬度和高弹性的特点, 广泛应用于制造轮轴、垫圈、凸轮、钢绳等承受较大载荷且在摩擦条件下工作的零件。在我国, CL60 钢车轮是列车普遍采用的辗钢车轮[1], 然而, 列车在运行过程中, 车轮与钢轨直接接触产生的滚动摩擦会导致车轮踏面出现擦伤和剥离现象。这不仅缩短了车轮的使用寿命, 增加了维修成本, 还降低了列车运行的安全性。因此, 对列车车轮进行表面强化处理, 以提高其表面强度、耐磨性等综合性能, 具有重要的实际意义。

激光熔覆(LC)是一种先进的表面改性技术, 通过同步或预置材料, 利用高能激光束将材料与基材表面薄层熔凝, 形成冶金结合的涂层。该技术具有结合力强、稀释率低、组织致密等特点[2]-[4], 广泛应用于机械零件修复和功能涂层。并且早在 2005 年, 国外学者 S. Niederhauser 就提出了激光熔覆技术在铁路运输中的潜力[5]。此外, 高熵合金(HEAs)由叶均蔚教授于 2004 年提出[6], 定义为至少五种主要元素以等原子或近等原子比例组成的合金。经过近 20 年的研究, 高熵合金展现出高强度、高抗疲劳性、优异抗氧化性等特性, 适应复杂工作环境, 应用前景广阔。在激光熔覆中, 高熵合金作为熔覆材料, 相比传统金属材料更具优势, 能更有效地强化基材表面性能。在激光熔覆过程中对涂层质量影响最大的是激光功率、扫描速度和送粉速率这三个工艺参数, 这三个关键因素之间存在显著的相互作用, 不当的参数设定会诱发涂层缺陷[7][8]。为了能够制备出质量良好、组织致密的涂层, 有很多学者对于工艺参数的优化问

题进行了深入研究。

赵永胜等[9]研究了激光熔覆钴基涂层工艺参数对涂层的组织、拉伸性能和耐磨损性能的影响, 结论是显微硬度随功率和送粉速率增加而提高, 随扫描速度增加而降低, 激光熔覆工艺显著影响熔宽、熔高和稀释率, 但对涂层的微观组织影响较小。张琢等[10]对 45 钢表面熔覆 Stellite6-8% WC 粉末的最佳工艺参数进行了研究, 通过正交试验分析得出最佳工艺参数组合为激光功率 1600 W, 扫描速度 5 mm/s, 送粉速率 20 g/min, 在此工艺参数组合下制备出涂层的平均显微硬度为 397 HV_{0.2}, 约为 45 钢基体的 1.6 倍。Huang, Y.等[11]通过响应面法研究了在 45 钢表面进行激光熔覆 CoCrCuFeNi 高熵合金涂层时的工艺参数并进行了优化, 结果表明: 纵横比随功率和速度增加而增大, 稀释率随功率降低或速度提高而减小, 硬度随功率降低和速度增加而提高。最佳参数为功率 773.65 W、速度 5 mm/s、送粉速率 15 g/min, 优化后涂层纵横比 5.07, 稀释率 14.29%, 硬度 186.8 HV。

目前, 激光熔覆研究多集中于 45 钢、316 不锈钢、Q235 碳素钢等低碳钢基体, 而对 CL60 钢等高碳钢的研究较少。同时, CrMnFeCoNi 高熵合金作为熔覆材料的研究主要聚焦于其力学性能, 缺乏对其在 CL60 钢激光熔覆工艺的系统探索。为此, 本文采用激光熔覆技术在 CL60 高碳钢表面制备 CrMnFeCoNi 单层多道高熵合金涂层, 通过正交实验/极差分析等得到最优参数, 并对其表面质量、微观形貌、稀释率、成形系数及显微硬度等进行了综合评估。研究旨在为 CL60 钢车轮的表面改性提供新思路, 并为激光熔覆涂层在列车车轮中的扩展应用提供实验和理论依据。

2. 实验材料与设计

2.1. 实验材料与设备

基体选用 CL60 钢, 利用电火花切割将基体切割为尺寸为 10 mm × 50 mm × 50 mm 的小块, 其组成成分详见表 1。在进行激光熔覆前先采用 SiC 砂纸对基体材料进行打磨, 去除表面氧化膜。随后使用浓度为 99% 的无水乙醇, 去除铁锈和油污。熔覆材料为 CrMnFeCoNi 高熵合金粉末, 该高熵合金粉末为气雾制粉, 按照 Cr:Mn:Fe:Co:Ni 原子比 1:1:1:1:1 配比合金化, 其粒度为 53~150 μm, 粉末形貌如图 1 所示, 粉末球形度较好, 均为球形或者近球形, 粉末中 5 种元素分布均匀, 纯度化学成分见表 2, 随后将板材和粉末在烘干箱中烘干 70℃ -5 h 备用。

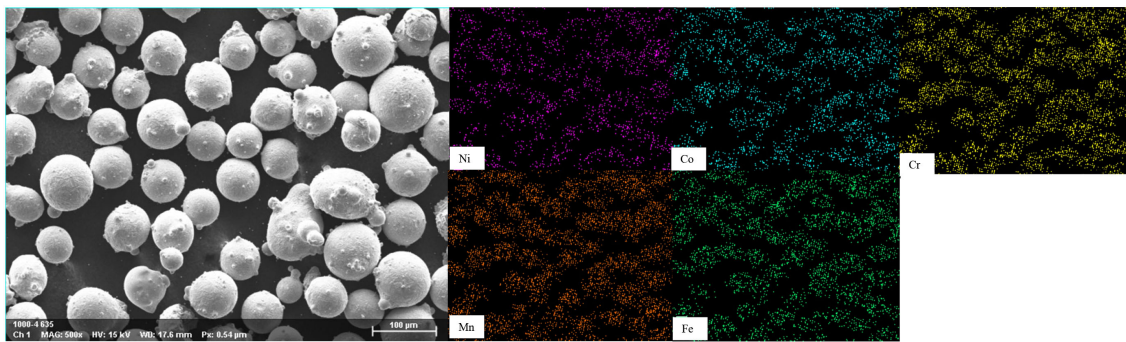


Figure 1. SEM morphology of CrMnFeCoNi powder
图 1. CrMnFeCoNi 粉末的 SEM 形貌

Table 1. Chemical composition of base CL60 steel (wt%)
表 1. 基体 CL60 钢的化学成分(wt%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Fe
CL60	0.55~0.65	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.040	Bal.

Table 2. Chemical composition of high-entropy alloy powder (wt%)
表 2. 高熵合金粉末化学成分(wt%)

Element	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	O
高熵合金粉末	19.45	19.43	20.27	20.05	20.78	0.03

激光熔覆系统由 LDF-4000-100VGP 激光器,水冷系统、控制系统、6 轴工业机器人(KUKA KR30HA)、激光头、双料载气式送粉器等组成,利用该系统在 CL60 钢表面制备多道涂层,板材预热温度为 300℃。对基板进行预热是最简单方法能够缓解快速冷却后熔覆后开裂的情况[12]。除此之外,涂层搭接率设置为 30%,光斑直径 4 μm,在熔覆过程中为了防止熔池中金属氧化和减少孔隙的形成,从空气中隔离氧气,保护气体是必不可少的,为此,采用纯度为 99.99%的氩气作为保护气体,流量及尾吹保护气流量分别为 5 L/min 和 15 L/min。

2.2. 实验方法设计

2.2.1. 正交实验

正交实验是对熔覆过程中的工艺参数进行优化的一种经济且有效的实验方法,可以充分关联所有影响因素和水平[13],避免多次实验。在激光熔覆过程中,激光功率、扫描速度和送粉速率三个因素相互作用,对涂层形貌和质量产生重要影响。因此,本文为了探究涂层形成的最佳工艺参数,通过查阅相关文献选用制定了参数范围,选用激光功率(kw)、扫描速度(mm/s)和送粉速率(g/min)等主要工艺参数设计了三因素三水平正交试验,排列方式见表 3。

Table 3. Orthogonal test parameter arrangement
表 3. 正交试验参数排列方式

试样	激光功率(kw)	扫描速度(mm/s)	送粉速率(g/min)
1-1	1.4	1	12
1-2	1.4	2	15
1-3	1.4	4	20
2-1	1.6	1	15
2-2	1.6	2	20
2-3	1.6	4	12
3-1	1.8	1	20
3-2	1.8	2	12
3-3	1.8	4	15

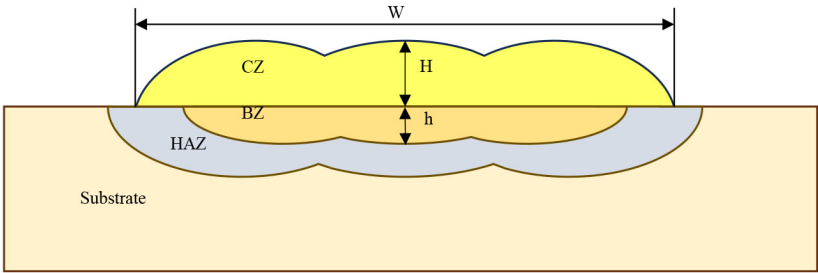


Figure 2. Schematic diagram of the coating cross-section
图 2. 涂层截面示意图

2.2.2. 涂层形貌质量测试

涂层的形貌包括宏观形貌和微观形貌两部分。用电火花切割将激光熔覆得到的样品沿着垂直于涂层的方向切开, 截面示意图如图 2 所示。

宏观形貌是通过观察判断涂层的表面质量, 包括涂层高度、宽度、长度、熔池的深度和表面形貌特征等。从而计算出相应的稀释率、成型系数, 进行初步筛选。稀释率[14]是指: 熔凝过程中基体材料被熔化并掺入到涂层中的比例, 即基体被熔化面积占整个熔覆面积的比例, 可以近似成熔深与熔深加熔高的比例。如公式(1)所示。

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

其中, η 为稀释率; h 为基体熔池深度, mm; H 为涂层高度, mm。

成型系数[15]是评价涂层质量的重要指标, 涂层的宽高比越大, 涂层的成型质量越好, 公式如(2)所示。

$$P = \frac{W}{H} \quad (2)$$

式中, P 为成型系数; W 为涂层宽度, mm; H 为涂层高度, mm。

在进行涂层的微观形貌观察时, 通过显微镜分析涂层的孔隙大小分布, 以及有无微小裂纹等, 再通过光镜(OM)、电镜(SEM)等观察晶粒结构、晶界和相分布情况, 同时可以通过能谱分析(EDS)技术, 可以评估元素在涂层中的分布情况, 确认是否存在元素偏析或不均匀分布等问题, 最终来判断涂层的质量。

2.2.3. 硬度测试

目前为止, 已经有许多学者[16]-[18]研究证明硬度与耐磨性是成正比的, 激光熔覆后的涂层硬度升高的同时耐磨性也随之越好。所以对涂层进行硬度的测试是必不可少的。硬度测试采用维氏显微硬度计, 载荷为 300 g, 加载时长为 15 s, 从涂层顶部开始向下每隔 0.1 mm 取一个点, 水平方向上打 3 个点取平均值, 由于本文采用多道熔覆进行实验, 每一个样品对每一个涂层都进行测试取平均值, 示意图如图 3 所示, 使得硬度的测试更加准确。

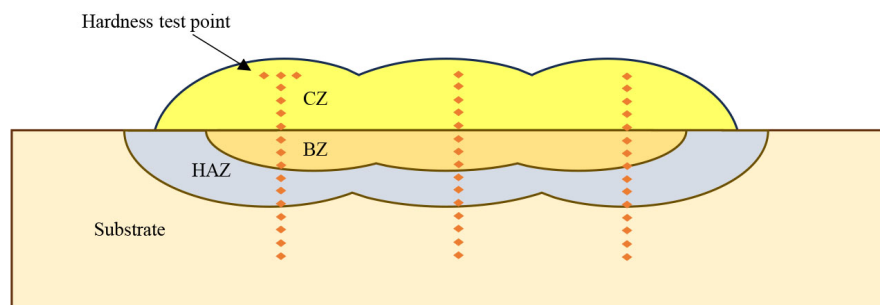


Figure 3. Schematic diagram of hardness test
图 3. 硬度测试示意图

3. 实验结果与讨论

3.1. 涂层的宏观形貌

涂层的宏观形貌如图 4 所示, 从图中可以看出到涂层的表面平整、均匀, 不存在明显的缺陷, 表明高熵合金具有良好的冶金结合性能。从图 4 中可以看出(7)号存在明显过烧现象。根据激光能量密度公式

[19]可知, (7)号涂层相比于其他涂层, 激光能量输入过大, 熔池内发生剧烈的反应, 导致涂层表面产生过烧现象, 所以为避免这样的问题发生, 在激光熔覆过程中应当选择合适的激光功率和扫描速度。激光能量密度公式见公式(3):

$$E = \frac{P}{DV} \quad (3)$$

其中, P 为激光功率、 D 为光斑直径、 V 为扫描速度。在本实验中激光光斑直径 D (4 mm) 是保持不变的。

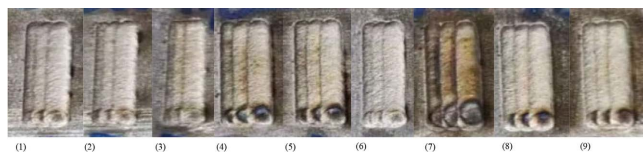


Figure 4. Macroscopic topography of the coating
图 4. 涂层的宏观形貌

3.2. 涂层的微观形貌

对试样块涂层和高熵合金粉末进行 XRD 测试和对比分析, 得到图 5, 在图中可以看出, 经过激光处理之后, 试样块涂层相较于粉末呈现出更强的衍射峰, 这表明块体具有更高的结晶度。但是与粉末相比, 并没有发生相变, 晶面方向均为(111), (200), (220), (311), (222), 对应面心立方(FCC)结构。

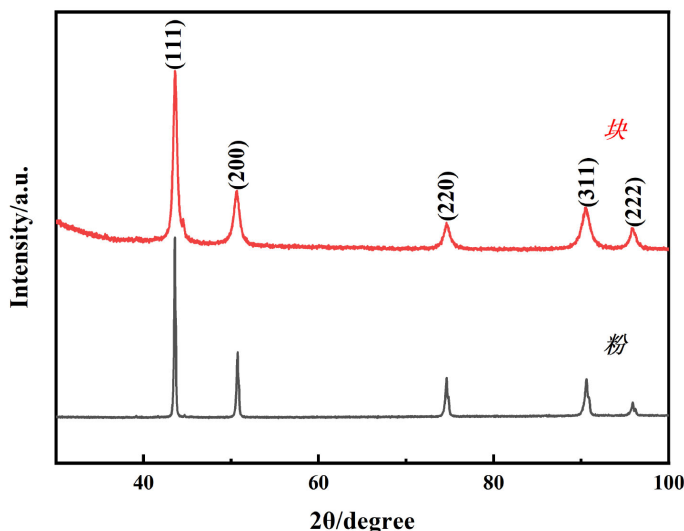


Figure 5. XRD patterns of coatings and high-entropy alloy powders
图 5. 涂层和高熵合金粉末的 XRD 图谱

通过光镜(OM)和扫描电镜(SEM)对试样块涂层进行进一步观察与分析。试样块横截面熔池体视镜如图 6 所示。根据图 6 中形貌并结合表 3 中数据, 初步分析可以得到, 熔池深度受激光能量密度影响较大, 激光能量密度越大熔池深度越大, 而涂层高度则受送粉速率影响较大, 送粉速率越大涂层高度越高。除此之外, 下图中(a)、(f)、(h)的熔池底部有明显不规则缺陷, 这表明涂层与基体的结合处并不处于良好的结合状态。同时说明送粉速率越小, 涂层与基体结合也越差, 可见本试验中 12 g/min 的送粉速率较低。试件(a)、(e)、(f)孔隙较多, 是激光能量密度与送粉速率不匹配导致。其余试件涂层与基体结合良好, 均无明显气孔和裂纹。本文采用极差分析方法进一步确认激光熔覆的最佳参数。

稀释率和成型系数的值根据图 6 中测量所得的涂层的高度、熔池的深度和涂层的宽度计算, 分别计算三个熔池深度和涂层高度取平均值, 减小误差, 稀释率和成型系数的结果如表 4 所示。

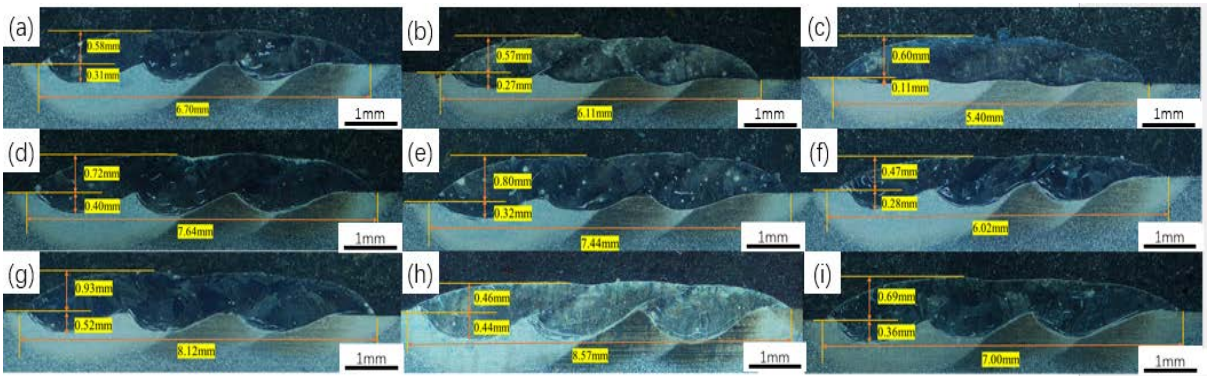


Figure 6. Cross-sectional melt pool morphology of the specimen block
图 6. 试样块横截面熔池形貌

为进一步细致观察试样块涂层的微观结构, 采用光镜(OM)观察的结果如图 7 所示。熔覆层晶体生长方向演变的扫描电镜(SEM)结果如图 8 所示。

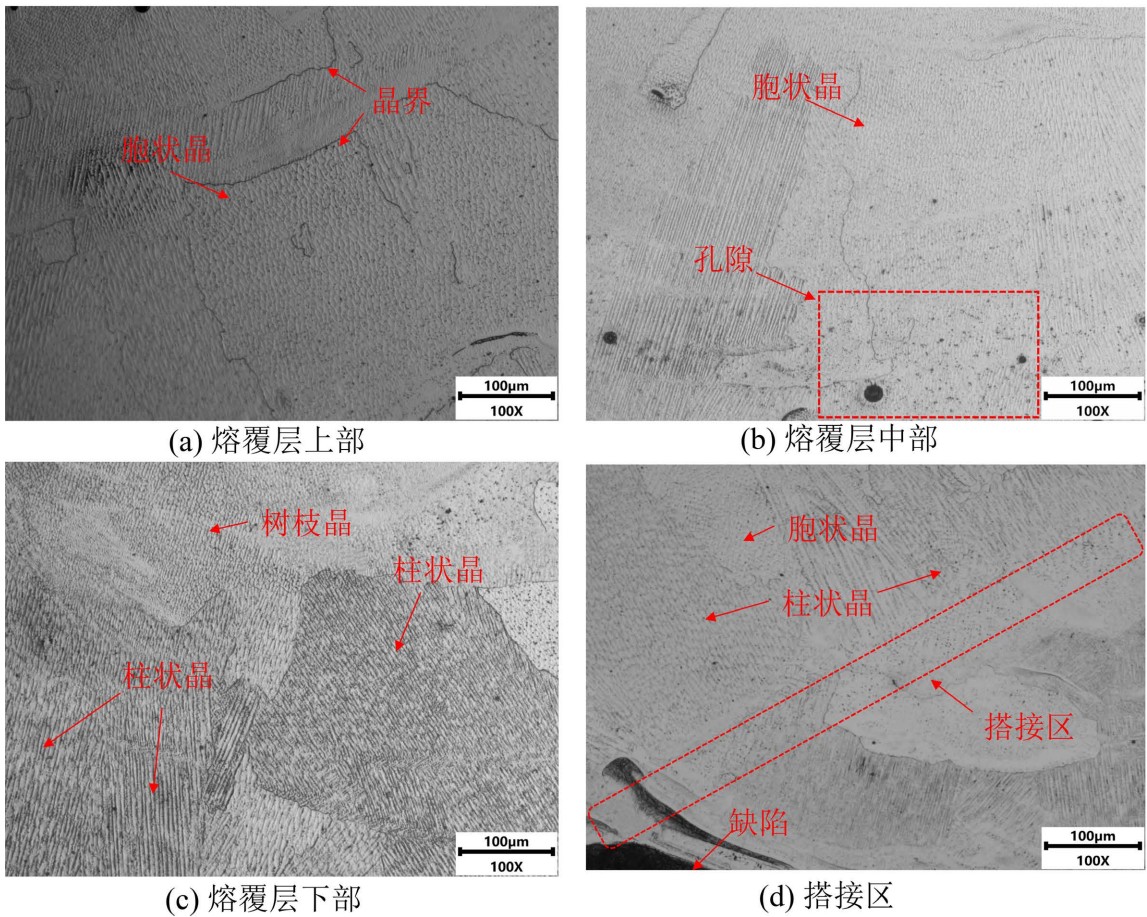


Figure 7. OM topography of the coating
图 7. 涂层的 OM 形貌

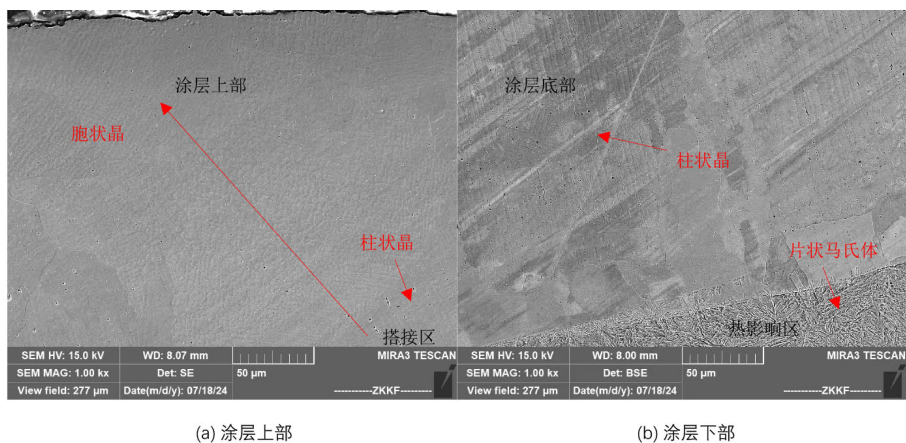


Figure 8. SEM topography of the coating
图 8. 涂层的 SEM 形貌

从图 7、图 8 中可以看到样品涂层组织清晰良好，涂层组织大部分是由胞状晶和柱状晶组成。图 8(a) 中可以看出，涂层搭接区以柱状晶为主，从搭接区向涂层上部过渡，晶粒由柱状晶逐渐转变为胞状晶；从图 8(b) 中可以看出，涂层底部主要分布着柱状晶。同时由凝固理论可知[20]，凝固组织的形貌与温度梯度(G)和凝固速率(R)的比值有关。在涂层边缘，凝固速率较快，此时 G/R 值较小，形成细小网状的胞晶；在涂层底部，温度梯度较大，此时 G/R 值较大，形成柱状晶或树枝晶。而在 G/R 值适中的涂层中部则形成柱状晶或树枝晶和胞状晶的混合组织。且由于柱状晶的生长方向受热流方向影响，所以在搭接区有明显的垂直于搭接方向的柱状晶和树枝晶。

3.3. 涂层硬度

涂层的硬度分布较为均匀，约为 180~200 $HV_{0.5}$ ，这是由于涂层中为 FCC 结构，FCC 结构的晶格畸变较小，对位错运动的阻碍作用较弱，表现出较低的硬度；热影响区的硬度高于涂层与基材，最高达到 696 $HV_{0.5}$ ；基材的硬度为 248 $HV_{0.5}$ 。硬度分布图如图 10 所示。热影响区硬度快速增加的主要原因是元素扩散引起的固溶强化，由于基体是 60 钢，具有较高的含碳量，并且在激光熔覆技术的快速冷却条件下，奥氏体极速向高碳马氏体进行转化，经过碳原子的时效强化生成片状马氏体，使得热影响区硬度急剧升高。热影响区形貌如图 9 所示。

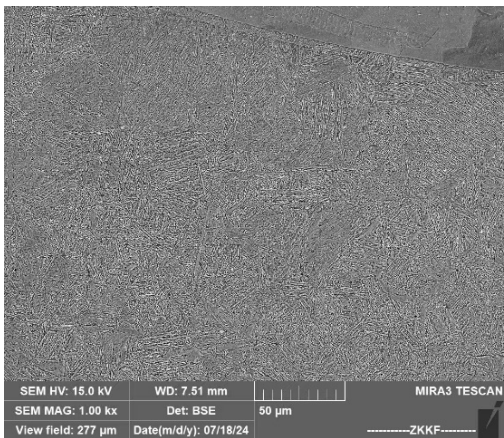


Figure 9. Topography of the heat-affected zone
图 9. 热影响区形貌

在 9 个样品中，他们的硬度值相近，硬度呈现大致相同的变化趋势，将 9 个样品的硬度值进行汇总，如图 10 所示。

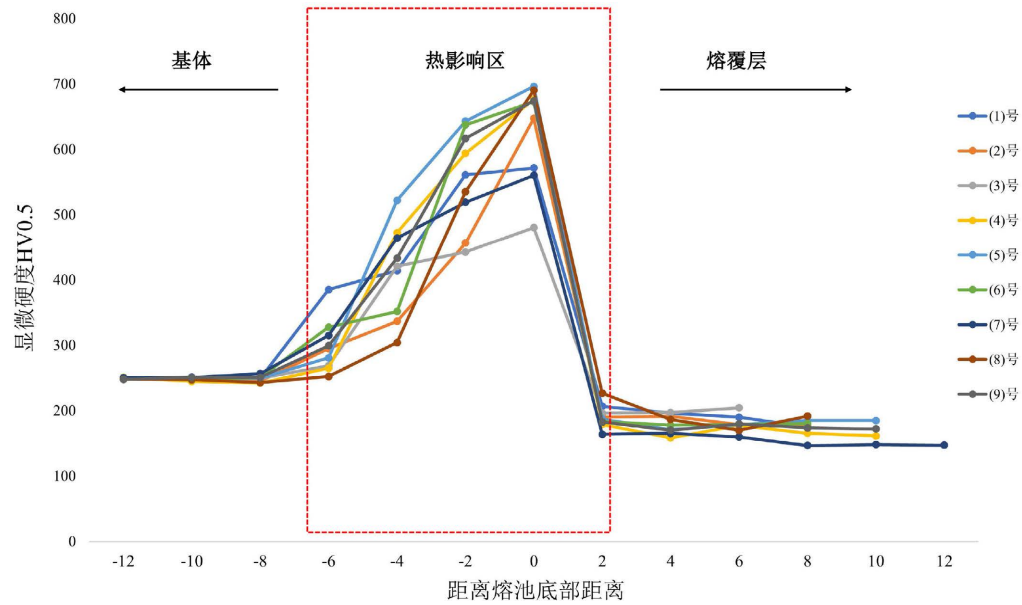


Figure 10. Summary of hardness results
图 10. 硬度结果汇总

3.4. 正交实验结果

将正交实验的实验结果稀释率、成型系数、硬度值进行汇总，见表 4。

Table 4. Summary of orthogonal experimental results
表 4. 正交实验结果汇总

序号	激光功率(KW)	扫描速度(mm/s)	送粉速率(g/min)	稀释率(%)	成型系数	显微硬度(HV _{0.5})
1	1.4	1	12	34.64%	3.8506	195.0736
2	1.4	2	15	21.67%	3.5731	186.7422
3	1.4	4	20	11.43%	3.0000	192.0531
4	1.6	1	15	35.01%	3.5370	182.7308
5	1.6	2	20	24.34%	3.1000	178.5135
6	1.6	4	12	37.16%	4.2695	180.0069
7	1.8	1	20	35.06%	6.2101	165.6341
8	1.8	2	12	47.61%	2.9103	195.8135
9	1.8	4	15	37.45%	3.3816	174.1619

根据正交实验结果中的形貌信息，结合表中数据，可以初步得到以下结论：随着激光功率的增加，涂层的稀释率在增加，但是激光能量过大会导致涂层材料过烧和不成形的问题；激光能量过小会导致，粉末熔化不完全会导致涂层有缺陷不连续的情况发生。相对于激光功率，扫描速度和送粉速率对涂层稀释率的影响较小，但是对涂层的硬度和成型系数影响更为显著。根据表中数据不能分析出最佳参数的选择，需要对数据进行进一步的极差处理分析来确定最优数据值。

3.5. 极差分析

在计算极差时需要用到以下参数：N 为特定因素下某一水平的所有结果之和；n 为特定因素下某一水平结果的算数平均值；R 为不同水平之间的极差值。极差值的大小反应了因素的影响程度，极差值愈大表示该值对应的因素影响愈大，极差值小则代表该值对应的因素影响程度小。因素 A、B、C 分别对应激光功率(单位：kw)、扫描速度(单位：mm/s)、送粉速率(单位：g/min)。

稀释率的极差分析表见表 5。

Table 5. Very poor dilution analysis results
表 5. 稀释率极差分析结果

稀释率	因素 A	因素 B	因素 C
N1	67.74%	104.71%	119.41%
N2	96.51%	93.62%	94.13%
N3	120.12%	86.04%	70.83%
n1	22.58%	34.90%	39.80%
n2	32.17%	31.21%	31.38%
n3	40.04%	28.68%	23.61%
R	17.46%	6.22%	16.19%

根据上表中稀释率 n 值的变化趋势可知，随着激光功率的增加，稀释率增加；而随着扫描速度和送粉速率增加，稀释率下降。根据数据显示，激光功率、扫描速度和送粉速率对应的极差值(R)分别是 17.46%、6.22%、16.19%，由于数值 17.46% > 16.19% > 6.22%，所以对涂层稀释率影响最大的是激光功率，其次是送粉速率，最后是扫描速度。通过选择稀释率最小的条件下对应的各因素，可以确定最低的参考方案是激光功率 1400 W、扫描速度 4 mm/s、送粉速率 20 g/min。同理，成型系数和显微硬度的计算如下表所示。

成型系数的极差分析结果见表 6。

Table 6. Forming coefficient range analysis results
表 6. 成型系数极差分析结果

成型系数	因素 A	因素 B	因素 C
N1	10.4237	13.5977	11.0304
N2	10.9065	9.5731	10.4917
N3	12.5012	10.6511	12.3101
n1	3.4745	4.5326	3.6768
n2	3.6355	3.1910	3.4972
n3	4.1673	3.5503	4.1033
R	0.6928	1.3416	0.6061

根据表 6 中数据可知，随着激光功率的增加，成型系数数值增大；而随着扫描速度和送粉速率增加，成型系数数值呈先减小再增大的趋势。极差值(R)体现了各因素对涂层成型系数的影响程度，结果显示激光功率、扫描速度和送粉速率对应的极差值分别是 0.6928、1.3416、0.6061，由于数值 1.341 > 0.6928 > 0.6061，由此可知对于涂层成型系数影响最大的是扫描速度，其次是激光功率，最后是送粉速率。通过选择成型系数对应各因素的最大值，可以确定成型系数最高的参考方案是激光功率 1800 W、扫描速度 1

mm/s、送粉速率 20 g/min。

平均显微硬度的极差分析结果见表 7。

Table 7. Average microhardness range analysis results

表 7. 平均显微硬度极差分析结果

显微硬度	因素 A	因素 B	因素 C
N1	573.8689	543.4385	570.8940
N2	541.2512	561.0692	543.6349
N3	535.6095	546.2219	536.2007
n1	191.2896	181.1461	190.2980
n2	180.4170	187.0231	181.2116
n3	178.5365	182.0740	178.7336
R	12.7531	5.8770	11.5644

根据平均显微硬度 n 值的变化趋势可知，随着激光功率和送粉速率的增加，显微硬度减小；而随着扫描速度增加，显微硬度呈先增加再减小的趋势。三个不同因素对应的极差值分别是 12.7531、11.5644、5.8770，由于数值 $12.7531 > 11.5644 > 5.8770$ ，根据极差的统计结果可以看出对于涂层显微硬度影响程度从大到小排列顺序是激光功率、送粉速率、扫描速度，根据选择显微硬度的最大值，确定显微硬度最高的参考方案选择激光功率 1400 W、扫描速度 2 mm/s、送粉速率 12 g/min。

综合考虑各个因素下的稀释率、成型系数和硬度的最佳水平，最终较优参数选择激光功率为 1400 W、扫描速度 1 mm/s、送粉速率 20 g/min。该参数下的涂层截面如图 11 中(a)所示。此时涂层的稀释率为：18.12%、成型系数为：3.57、涂层平均硬度为：170.65 HV_{0.5}。

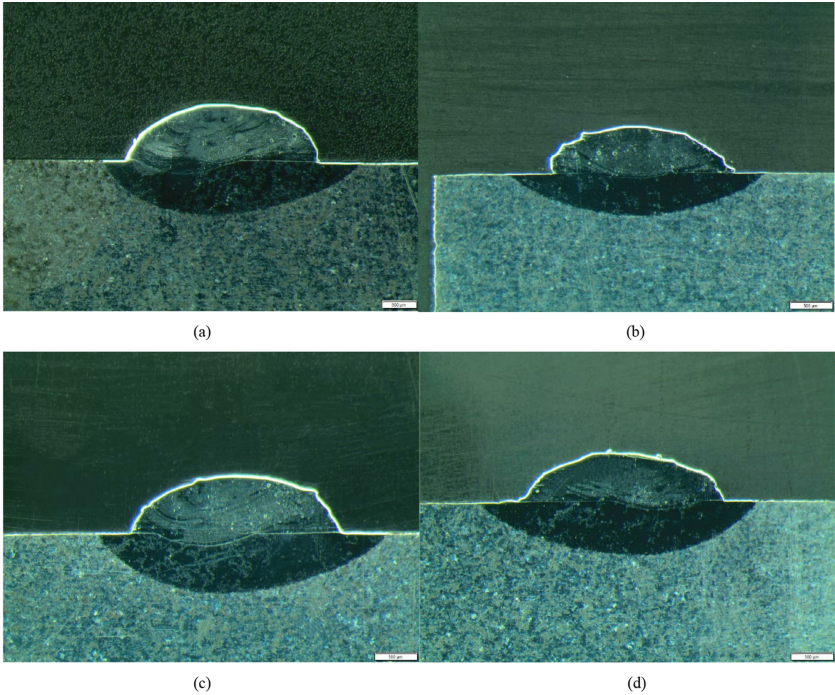


Figure 11. Stereo mirrors at different scanning speeds

图 11. 不同扫描速度下的体视镜

根据上述的结论，成型系数随着扫描速度的增大呈现先减小后增大的趋势，为了再次探究更合适的参数得到更优的成型系数，同时为了避免多道熔覆的偶然性并且节省成本，现另外设置三组不同扫描速度下的参数，进行单道涂层的实验，进行横向比较。

设置扫描速度分别为：2 mm/s、4 mm/s、8 mm/s，涂层分别对应图 11 中(b) (c) (d)，他们的 SEM 微观图像如图 12 所示。

样品涂层的硬度、稀释率、成型系数汇总见表 8。

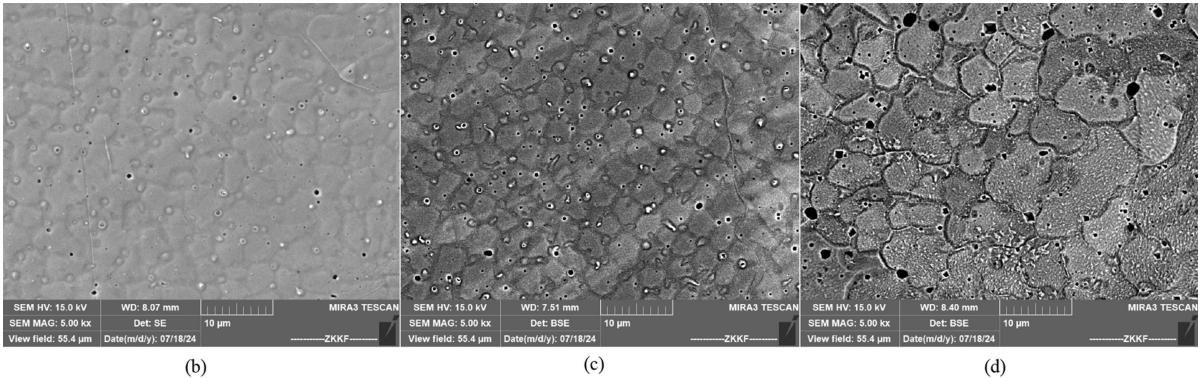


Figure 12. SEM images at different scanning speeds (b) 2 mm/s, (c) 4 mm/s, (d) 8 mm/s
图 12. 不同扫描速度下的 SEM 图像(b) 2 mm/s, (c) 4 mm/s, (d) 8 mm/s

不同扫描速度下的稀释率、成型系数、硬度值汇总见表 8。

Table 8. Results under different scan speed parameters
表 8. 不同扫描速度的参数下结果

样品	稀释率(%)	成型系数	硬度(HV _{0.5})
a	18.12%	3.5768	170.65
b	10.5%	4.1063	179.75
c	15.5%	4.3542	181.25
d	18.86%	3.3856	180.33

表 8 中数据表明，随着扫描速度的增大，成型系数呈现先增大后减小的趋势。结合图 12 中的微观结构分析，可以看出涂层的微观组织结构良好，其中样品 c 的晶粒最为细小。根据霍尔佩奇效应(Hall-Petch effect) [21]，材料的屈服强度与晶粒尺寸密切相关，晶粒越细，材料的强度越高。霍尔佩奇效应的数学表达式为：

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \tag{4}$$

其中， σ_y 为材料的屈服强度， σ_0 为单晶材料的屈服强度， k 为材料常数， \sqrt{d} 为晶粒尺寸。从公式可以看出，晶粒尺寸 d 越小，屈服强度 σ_y 越高。因此，样品 c 由于晶粒最为细小，其强度也相对较高。结合表中数据，最后最佳涂层的工艺参数选择为激光功率 1400 W、扫描速度 4 mm/s、送粉速率 20 g/min。

3.6. 本章小结

激光增材制造的工艺参数对沉积层成形及缺陷有重要影响，通过优化工艺参数，可提高成型效果，

抑制气孔和缺陷以及细化晶粒。使用合金粉进行同步送粉激光增材制造可得到较大尺寸的成形良好, 无明显缺陷的沉积层, 但是仍然有该工艺的最佳工艺参数为: 激光功率 1400 W, 激光扫描速度 4 mm/s, 搭接率 30%, 送粉速度 20 g/min, 保护气流量 5 L/min, 尾吹保护气流量 15 L/min。

4. 结论

本研究采用 CL60 钢为基体, CrMnFeCoNi 高熵合金粉末为熔覆材料, 通过正交实验计算出激光熔覆的最佳参数, 且研究了不同激光功率、扫描速度和送粉速率下对涂层成型质量及微观组织的影响, 具体结论如下:

(1) 根据正交实验以及单参数变化实验的结果得出最佳的激光熔覆工艺参数是: 激光功率 1400 W, 激光扫描速度 4 mm/s, 送粉速率 20 g/min。这一研究结果为后续通过添加硬质相提升激光涂层硬度提供了可靠的理论依据。

(2) 工艺参数对涂层性能的影响程度如下: 对稀释率的影响从大到小依次为激光功率、送粉速率、扫描速度; 对成型系数的影响从大到小依次为扫描速度、激光功率、送粉速率; 对硬度的影响从大到小依次为激光功率、送粉速率、扫描速度。其中, 激光功率对稀释率和硬度的影响最为显著, 是控制涂层性能的关键参数; 送粉速率主要影响涂层的结合质量; 扫描速度则显著影响熔覆层的长宽比(成型系数), 同时对硬度也有一定影响。因此, 在实际工艺优化中, 应优先调整激光功率以控制稀释率和硬度, 同时通过调节扫描速度优化成型系数, 并结合送粉速率进行协同优化, 以实现涂层综合性能的全面提升。

(3) 针对高碳钢基体激光熔覆高熵合金涂层, 由于其含碳量过高容易在快冷时形成脆硬的片状马氏体, 所以在高碳钢上进行激光熔覆实验时, 应该更注重预热和控制温度等方法, 注重参数优化, 深入研究复杂过程、结合实验验证和优化, 以实现高质量高强度表面激光熔覆涂层。

参考文献

- [1] 任明. CL60 钢化学成分与机械性能的回归分析[J]. 机械工程与自动化, 2016, 195(2): 140-141.
- [2] Siddiqui, A.A. and Dubey, A.K. (2021) Recent Trends in Laser Cladding and Surface Alloying. *Optics & Laser Technology*, **134**, Article ID: 106619. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106619>
- [3] Richhariya, V., Dubey, R. and Siddiqui, R. (2015) Hybrid Approach for Load Balancing in Cloud Computing. *Oriental Journal of Computer Science & Technology: An International Open Access Peer Reviewed Research Journal*, **8**, 3.
- [4] Zhu, L., Xue, P., Lan, Q., Meng, G., Ren, Y., Yang, Z., et al. (2021) Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A Review. *Optics & Laser Technology*, **138**, Article ID: 106915. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915>
- [5] Niederhauser, S. (2005) Laser Cladded Steel: Microstructures and Mechanical Properties of Relevance for Railway Applications. *Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Hogskola*, **2394**, 1-60.
- [6] Yeh, J., Chen, S., Lin, S., Gan, J., Chin, T., Shun, T., et al. (2004) Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*, **6**, 299-303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- [7] Gao, Z., Wang, L., Wang, Y., Lyu, F. and Zhan, X. (2022) Crack Defects and Formation Mechanism of FeCoCrNi High Entropy Alloy Coating on TC4 Titanium Alloy Prepared by Laser Cladding. *Journal of Alloys and Compounds*, **903**, Article ID: 163905. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163905>
- [8] Luo, D., Liu, C., Wang, C., Wang, Y., Wang, X., Zhao, J., et al. (2024) Optimization of Multilayer Laser Cladding Process Parameters Based on NSGA-II-MOPSO Algorithm. *Optics & Laser Technology*, **176**, Article ID: 111025. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111025>
- [9] 赵永胜, 葛超, 吴影, 等. 激光熔覆工艺对 CoCrMo 钴基合金涂层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(23): 216-227.
- [10] 张琢. 45 钢表面激光熔覆 Stellite6-8%WC 涂层工艺参数优化[J]. 科学技术创新, 2024(5): 57-60.
- [11] Huang, Y., Hu, Y., Zhang, M., Mao, C., Wang, K., Tong, Y., et al. (2022) Multi-Objective Optimization of Process Parameters in Laser Cladding CoCrFeNi High-Entropy Alloy Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*, **31**, 1985-

2000. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01408-x>
- [12] Shi, W., Cheng, C., Zhang, B., An, F., Li, K., Xiong, Z., *et al.* (2024) Effect of Substrate Preheating Temperature on the Microstructure and Properties of Laser Cladding Fe/tic Composite Coating. *Lubricants*, **12**, Article 216. <https://doi.org/10.3390/lubricants12060216>
- [13] 纪皓文. 超声辅助激光熔覆 Inconel 625 高温合金工艺实验研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [14] Zhang, B., Wang, H., Zhang, S. and He, B. (2023) Optimization of the Dilution Parameters to Improve Wear Resistance of Laser Cladding 15-5PH Steel Coating on U75V Pearlitic Steel. *Surface and Coatings Technology*, **465**, Article ID: 129571. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129571>
- [15] 卢青天. 激光熔覆 CoCrNi-FeNi 涂层的热疲劳性能和磨损性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2024.
- [16] 周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe901}$ 复合涂层的强化机制及耐磨性[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 219-227.
- [17] 王清波, 窦新旺, 晁明举, 等. Mo 对高硬度镍基合金激光熔覆层组织和耐磨性的影响[J]. 应用激光, 2005(2): 97-100.
- [18] 方振兴, 祁文军, 李志勤. 304 不锈钢激光熔覆搭接率对 CoCrW 涂层组织与耐磨及耐腐蚀性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12123-12129.
- [19] 郭亚俊. 不锈钢表面激光熔覆高熵合金基复合涂层的组织与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
- [20] Jelvani, S., Shoja Razavi, R., Barekat, M., Dehnavi, M.R. and Erfanmanesh, M. (2019) Evaluation of Solidification and Microstructure in Laser Cladding Inconel 718 Superalloy. *Optics & Laser Technology*, **120**, Article ID: 105761. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105761>
- [21] Chokshi, A.H., Rosen, A., Karch, J. and Gleiter, H. (1989) On the Validity of the Hall-Petch Relationship in Nanocrystalline Materials. *Scripta Metallurgica*, **23**, 1679-1683. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(89\)90342-6](https://doi.org/10.1016/0036-9748(89)90342-6)