

# 核电阀门旁轴送丝激光熔覆司太立合金工艺研究

马信锋<sup>1</sup>, 彭华俊<sup>1</sup>, 王健<sup>2</sup>, 阮红冰<sup>1</sup>, 师延财<sup>1</sup>, 李彪<sup>1</sup>, 丁建坤<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>中核检修有限公司福清分公司, 福建 福州

<sup>2</sup>华业激光技术(无锡)有限公司, 江苏 无锡

<sup>3</sup>上海电机学院机械学院, 上海

收稿日期: 2026年2月18日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月26日

## 摘要

针对核级阀门密封面原位修复需求, 本文采用旁轴送丝激光熔覆工艺在A42AP钢表面制备Stellite 6合金熔覆层, 系统研究扫描速度对熔覆层成形质量及力学性能的影响规律。通过着色渗透检测、截面金相分析与显微硬度测试, 评价不同热输入条件下的熔覆层缺陷敏感性、几何精度及截面硬度分布特征。结果表明: 三种扫描速度下均可获得表面成形良好、无裂纹未熔合等缺陷的熔覆层; 随扫描速度提升, 线能量密度降低导致熔池存在时间缩短, 熔覆层厚度由 $3190 \pm 57 \mu\text{m}$ 递减至 $1632 \pm 85 \mu\text{m}$ , 且厚度波动幅度增大; 熔覆层硬度均显著高于基体, 但随扫描速度增加呈下降趋势且均匀性劣化, 高速扫描下热输入不足导致的层间重熔不充分及冷却速率过快, 是硬度离散度增大的主要原因。

## 关键词

旁轴送丝激光熔覆, Stellite 6合金, 扫描速度, 成形质量, 硬度分布

# Research on Laser Cladding Process of Stellite Alloy for Nuclear Power Valves with Side-Axial Wire Feeding

Xinfeng Ma<sup>1</sup>, Huajun Peng<sup>1</sup>, Jian Wang<sup>2</sup>, Hongbing Ruan<sup>1</sup>, Yancai Shi<sup>1</sup>, Biao Li<sup>1</sup>, Jiankun Ding<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>CNNC Maintenance Co., Ltd. Fuqing Branch, Fuzhou Fujian

<sup>2</sup>Huaye Laser Technology (Wuxi) Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai

\*通讯作者。

文章引用: 马信锋, 彭华俊, 王健, 阮红冰, 师延财, 李彪, 丁建坤. 核电阀门旁轴送丝激光熔覆司太立合金工艺研究[J]. 材料科学, 2026, 16(3): 144-150. DOI: 10.12677/ms.2026.163061

## Abstract

To meet the *in-situ* repair requirements of nuclear valve sealing surfaces, Stellite 6 alloy coating is deposited on A42AP steel substrates via side-axial wire-feeding laser cladding. The effects of scanning speed on forming quality and mechanical properties are systematically investigated. Defect sensitivity, geometric accuracy, and cross-sectional hardness distribution are evaluated through dye penetrant testing, metallographic analysis, and microhardness measurements. Results indicate that no cracks or lack of fusion are found in the coatings without under all three scanning speeds. As the scanning speed increases, the linear energy density decreases, leading to a shortened molten pool duration. Consequently, the thickness of the cladding layer decreases from  $3190 \pm 57 \mu\text{m}$  to  $1632 \pm 85 \mu\text{m}$ . The hardness of the cladding layer is significantly higher than that of the substrate, but it tends to decrease and its uniformity deteriorates with increasing scanning speed. The insufficient heat input during high-speed scanning leads to inadequate interlayer remelting and an excessively fast cooling rate, which are the main reasons for the increased hardness dispersion.

## Keywords

Side-Axial Wire-Feeding Laser Cladding, Stellite 6 Alloy, Scanning Speed, Forming Quality, Hardness Distribution

Copyright © 2026 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

核电站阀门密封面作为反应堆冷却剂压力边界的关键屏障，其结构完整性直接关系到核安全功能的实现。核级阀门长期服役于含硼水化学环境，密封面持续承受腐蚀、冲蚀及微动疲劳的协同损伤，易发生点蚀、裂纹及材料剥落等失效形式，引发阀门内漏风险。现行维护策略中，轻度缺陷依赖现场研磨恢复型线，而深度缺损则需整体更换。然而，核岛内部空间局促，受早期布置设计限制，整体更换往往伴随大范围结构拆装，检修周期长、发电损失大。以某核电厂主给水调节阀为例，经多轮研磨后密封面已接近设计允许减薄极限，传统修复手段面临失效。这一工程困境凸显了发展原位再制造技术的迫切性，而激光熔覆技术凭借其局部加热、冶金结合、组织可控的特点，成为重建阀门密封面耐磨耐蚀合金层的优选方案[1]。

针对核级阀门密封面的严苛服役条件，激光熔覆 Stellite 6 钴基合金技术展现出显著的材料与工艺适配性[2]。Stellite 6 合金是以钴为基体、含 Cr (27%~32%)、W (3%~5%)及 C (0.9%~1.4%)的钴基铸造合金，其显微组织为面心立方结构的  $\gamma$ -Co 奥氏体固溶体与  $M_7C_3$ 、 $M_{23}C_6$  型共晶碳化物的混合结构[3]，赋予其优异的高温耐磨性、耐汽蚀性及耐含硼水腐蚀性能，适用于高温高压蒸汽环境[4]。国内外学者通过激光熔覆 Stellite 6 合金显著提升了材料的耐摩擦磨损性能。Liu 等[5]通过激光熔覆，使 316L 不锈钢表面 Stellite 6 涂层的磨损率降低 59.83%。Karmakar 等[6]在 AISI H13 钢表面激光熔覆 Stellite 6 涂层，发现涂层在高温下仍保持优异的耐磨性。Bartkowski 等[7]采用激光合金化在 S355 钢表面制备 Stellite-6 涂层，涂层显微硬度和耐磨性均显著高于基体材料。

在工艺方法上，旁轴送丝激光熔覆相较传统等离子喷焊及同步送粉激光熔覆具有独特优势[8]。丝材

经激光预熔后进入熔池,材料利用率接近 100%,无粉末飘散造成的成分偏析与环境污染风险;单层熔覆厚度可达 1~4 mm,可满足密封面深度缺损的一次性修复需求;热输入精确可控,热影响区窄,熔覆层组织细密[9]。然而,旁轴送丝激光熔覆的工艺参数(如扫描速度、送丝速率、激光功率等)对熔覆层的几何形貌、凝固组织及力学性能具有显著影响[7][9]。研究表明,扫描速度通过调控热输入与冷却速率,显著改变熔池的流动行为、二次枝晶间距及碳化物分布形态,进而影响熔覆层的显微硬度与耐磨性能[7][9]。在核级阀门密封面修复中,熔覆层硬度直接决定其抗摩擦磨损能力与密封可靠性[10],是保障阀门启闭寿命与密封等级的关键指标。因此,优化扫描速度等关键工艺参数,建立成形质量与硬度的协同控制方法,对确保修复层服役性能具有重要意义。

本文针对核级阀门密封面修复需求,采用旁轴送丝激光熔覆工艺在阀体材料 A42AP 表面制备 Stellite 6 合金层,重点研究扫描速度对熔覆层成形质量、微观组织及硬度的影响规律,旨在建立适用于核级阀门密封面修复的激光熔覆工艺参数窗口,为缩短检修工期、保障修复层长期服役可靠性提供理论依据与技术支持。

## 2. 实验方法与材料

### 2.1. 实验材料

本文选用直径 1.2 mm 的 Stellite 6 钴基合金丝材作为熔覆材料,以核电阀门密封圈常用材料 A42AP 合金为基体试板,构建旁轴送丝激光熔覆试验平台。A42AP 钢与 Stellite 6 合金的化学成分如表 1 所示。

**Table 1.** Chemical composition of substrate and cladding material (mass fraction/%)

**表 1.** 基材及熔覆层材料成分(质量分数/%)

牌号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	W	Mo	Cu	Co	Fe
Stellite6	1.0	1.8	1.2	29.5	2.8	2.0	4.2	1.0	/	Bal.	/
A42AP	0.2	0.25	0.65	0.1	0.1	/	/	/	0.15	/	Bal.

### 2.2. 旁轴送丝激光熔覆工艺方案

本文采用单层多道熔覆策略,以激光扫描速度为主要变量,具体试验参数如下:(1)采用多道搭接策略在 50 mm × 50 mm 范围内制备熔覆层;(2)激光源采用额定功率 2.5 KW,搭接率选用 50%,送丝速度选用 1200 mm/min,送丝角度 45°;(3)扫描速度分别设定为 300 mm/min、400 mm/min 和 500 mm/min;(4)焊前进行机械清理与除油处理,熔覆完成后空冷至室温。

### 2.3. 测试方法

采用着色渗透探伤方法对熔覆层表面进行缺陷检测:预处理清除工件表面油污,渗透时间控制在 30 min,显像剂涂层厚度保持在 0.1 mm 范围内以保证显像清晰度。

利用中走丝线切割设备切取试样,磨抛后采用 DMM-480C 倒置金相显微镜对熔覆层截面进行成形质量观测。

使用 HVST-1000A+CCD 自动转塔显微硬度计进行室温维氏硬度测试。载荷 0.5 Kg,保载时间 10 s。从熔覆层顶部到基体每隔 0.1 mm 取点测量显微硬度,每组测量三次取平均值。

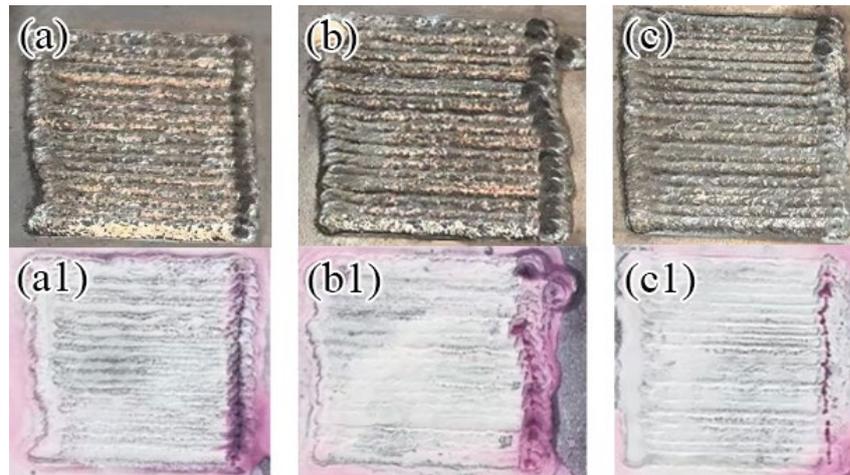
## 3. 试验结果与讨论

### 3.1. 外观成型与无损检测

采用旁轴送丝激光熔覆工艺在 A42AP 基体表面制备 Stellite 6 合金层,如图 1(a)~(c)所示。在不同扫

描速度(300 mm/min, 400 mm/min, 500 mm/min)条件下, 熔覆层表面均呈现均匀连续的金属光泽, 无明显氧化变色、飞溅粘附或宏观裂纹。

对熔覆层进行渗透无损检测, 如图 1(a1)~(c1)所示。三种扫描速度下制备的熔覆层表面及近表面均无可显示裂纹、未熔合或线状缺陷, 熔覆层与基体结合界面连续完整, 满足核级阀门密封面修复的无损检测验收要求。初步证实旁轴送丝激光熔覆工艺在所述参数窗口内具有良好的工艺稳定性与抗裂敏感性。

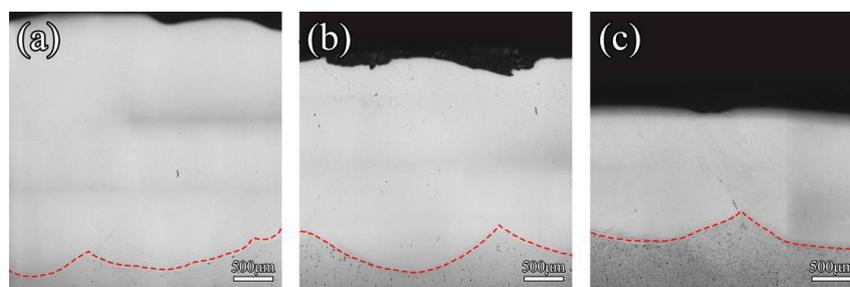


**Figure 1.** Surface morphologies and non-destructive testing results of Stellite 6 coatings at different scanning speeds: (a) 300 mm/min; (b) 400 mm/min; (c) 500 mm/min

**图 1.** 不同扫描速度 Stellite 6 涂层形貌及探伤结果: (a) 300 mm/min; (b) 400 mm/min; (c) 500 mm/min

### 3.2. 熔覆层成型质量与层厚

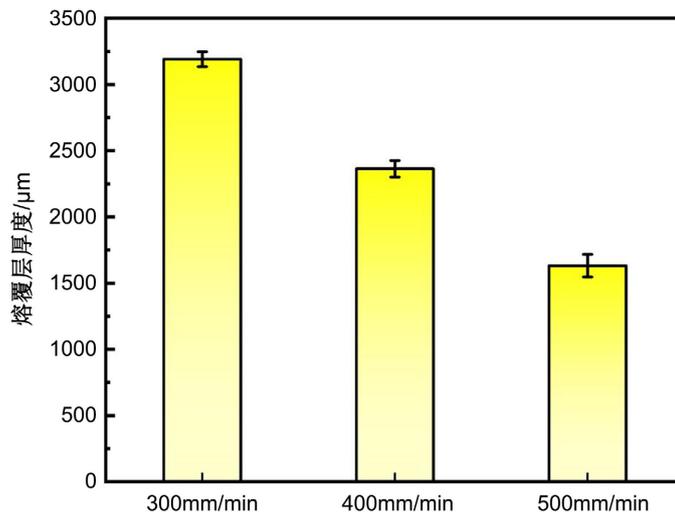
沿熔覆层横截面制备金相试样, 经研磨抛光后观察, 熔覆层截面宏观形貌如图 2 所示。三种扫描速度条件下的熔覆层与基体均实现了良好的冶金结合, 界面处未见未熔合、夹杂或气孔等缺陷, 熔合线清晰连续。熔覆层内部致密, 未发现明显的凝固缩孔或气孔缺陷, 证实旁轴送丝方式在稳态熔覆过程中具有良好的熔池稳定性与排气能力。



**Figure 2.** Cross-sectional morphologies of Stellite 6 cladding layers by side-feed laser cladding: (a) 300 mm/min; (b) 400 mm/min; (c) 500 mm/min

**图 2.** 旁轴送丝激光熔覆 Stellite 6 熔覆层横截面形貌: (a) 300 mm/min; (b) 400 mm/min; (c) 500 mm/min

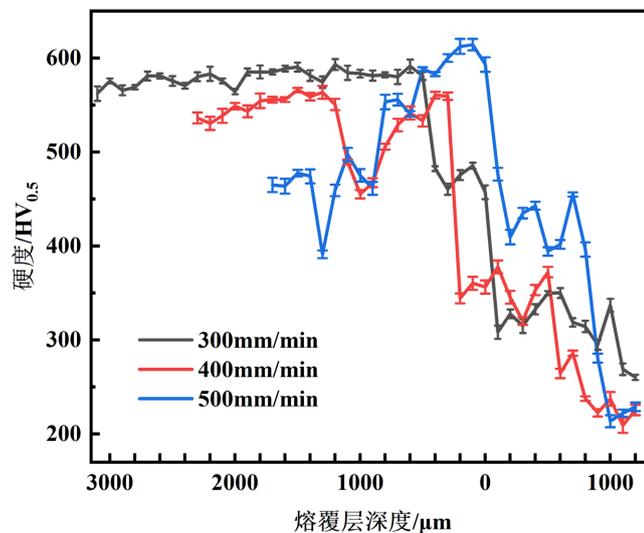
对熔覆层几何尺寸进行定量分析, 结果如图 3 所示。300 mm/min 时, 熔覆层厚度为  $3190 \pm 57 \mu\text{m}$ ; 400 mm/min 时, 熔覆层厚度为  $2363 \pm 63 \mu\text{m}$ ; 500 mm/min 时, 熔覆层厚度为  $1632 \pm 85 \mu\text{m}$ 。结果表明, 随着扫描速度的提升, 热输入降低, 熔覆层厚度呈现显著递减趋势。这是由于线能量密度随扫描速度增加而降低, 熔池存在时间缩短, 单位长度内沉积的熔覆材料减少所致[11][12]。



**Figure 3.** Cladding layer thickness under different process parameters  
**图 3.** 不同工艺下熔覆层厚度

### 3.3. 硬度结果

不同扫描速度下,沿熔覆层顶部垂直贯穿至基体内部硬度的变化趋势测试如图 4 所示。当扫描速度为 300 mm/min 时,熔覆层硬度为  $589.56 \pm 8.06 \text{ HV}_{0.5}$ ,截面硬度分布平缓且均匀;当扫描速度为 400 mm/min 时,熔覆层硬度为  $535.33 \pm 31.09 \text{ HV}_{0.5}$ ,呈明显阶梯式分布;当扫描速度为 500 mm/min 时,熔覆层硬度为  $522.43 \pm 67.23 \text{ HV}_{0.5}$ ,截面硬度分布极不均匀,呈剧烈波动状态,随着深度的增加,硬度先降低后增加。400 mm/min 和 500 mm/min 条件下观察到的硬度阶梯式分布与剧烈波动,与多道搭接过程中的热循环机制密切相关[13]。后续搭接道次对已凝固层的热作用导致搭接区经历回火软化,形成周期性硬度低谷,而道中心区域则保留较高的原始硬度,从而呈现软硬交替的层状分布特征[14]。



**Figure 4.** Cross-sectional hardness distribution of cladding layers under different process parameters  
**图 4.** 不同工艺下熔覆层截面硬度

三种工艺均可获得的熔覆层硬度显著高于基体( $200 \text{ HV}_{0.5}$ )。但随着扫描速度提升,熔覆层硬度整体呈

下降趋势，且截面均匀性显著劣化。300 mm/min 时，适中的热输入与冷却速率有利于形成均匀细密的枝晶组织和弥散分布的碳化物，故硬度高且波动小[15] [16]。400 mm/min 时，热输入降低导致部分区域熔化不充分，形成硬度高低交替的层状分布[17] [18]。500 mm/min 时，过高的扫描速度使熔池存在时间过短，冷却速率过快且不稳定，导致元素烧损或异常相析出[19]-[21]，造成硬度在 391 HV0.5 至 614 HV0.5 间剧烈震荡。这种不均匀的硬度分布将显著增加密封面研磨加工的难度，且易在软硬交界处萌生疲劳裂纹[22]，影响阀门启闭寿命。

#### 4. 结论

本文针对核电阀门密封面修复需求，采用旁轴送丝激光熔覆技术在 A42AP 钢表面制备 Stellite 6 熔覆层，系统研究了扫描速度对熔覆层成形质量及硬度的影响规律，主要结论如下：

(1) 在激光功率 2.5 KW、搭接率 50%的工艺条件下，三种扫描速度(300, 400, 500 mm/min)均可获得表面成形良好、无裂纹气孔等缺陷的熔覆层，着色渗透检测均未发现可显示缺陷。

(2) 三种工艺下熔覆层与基板结合良好，界面处未观察到未熔合、夹杂等缺陷。随着扫描速度由 300 mm/min 提升至 500 mm/min，熔覆层厚度由  $3190 \pm 57 \mu\text{m}$  递减至  $1632 \pm 85 \mu\text{m}$ ，且厚度波动随速度增加而增大。

(3) 三种扫描速度下熔覆层硬度均显著高于基体(约 200 HV<sub>0.5</sub>)，但随扫描速度提升，硬度整体呈下降趋势且截面均匀性显著劣化。300 mm/min 时硬度分布平缓，400 mm/min 时呈层状起伏，500 mm/min 时波动剧烈，极不均匀的硬度分布将增加后续机加工难度及服役失效风险。高速扫描下热输入不足导致的层间重熔不充分及冷却速率过快，是硬度离散度增大的主要原因。

#### 基金项目

中核检修福清项目(ZJXC-25-00341, ZJXC-25-00295)。

#### 参考文献

- [1] Raj, D.R., Maity, S.R. and Das, B. (2021) State-of-the-Art Review on Laser Cladding Process as an In-Situ Repair Technique. *Journal of Process Mechanical Engineering*, **236**, 1194-1215. <https://doi.org/10.1177/09544089211044558>
- [2] 刘福广, 李勇, 杨二娟, 等. 超(超)临界核用耐热钢激光熔覆钴基合金修复研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 220-228.
- [3] Soltanipour, A., Heydarzadeh Sohi, M., Shoja-Razavi, R., *et al.* (2024) Effect of Processing Parameters on the Microstructure of Laser-Clad Stellite 6 on the X19CrMoNbVN11-1 Stainless-Steel Substrate. *Heliyon*, **10**, e30176. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30176>
- [4] 张维, 尚宪和, 胡明磊, 等. 激光功率对激光熔覆 Stellite 6 合金涂层微观组织及耐磨性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2025, 43(2): 170-179.
- [5] Liu, C., Wang, Y., Gu, B., Xu, G., Guo, H., Sun, S., *et al.* (2025) Effect of Ultrasonic Impact Treatment on the Wear and Corrosion Resistance of Laser Cladding Stellite 6 Alloy Coating. *Journal of Alloys and Compounds*, **1041**, Article 183823. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183823>
- [6] Karmakar, D.P., Muvvala, G. and Nath, A.K. (2021) High-Temperature Abrasive Wear Characteristics of H13 Steel Modified by Laser Remelting and Cladded with Stellite 6 and Stellite 6/30% WC. *Surface and Coatings Technology*, **422**, Article 127498. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127498>
- [7] Bartkowski, D., Bartkowska, A., Olszewska, J., Przystacki, D. and Ulbrich, D. (2023) Stellite-6/(WC+TiC) Composite Coatings Produced by Laser Alloying on S355 Steel. *Materials*, **16**, 5000-5018. <https://doi.org/10.3390/ma16145000>
- [8] Yao, M. and Kong, F. (2025) A Review on Laser Cladding with Wire Feeding: Process Fundamentals, Theoretical Analyses, Online Monitoring, and Quality Controls. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **137**, 4209-4242. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15447-5>
- [9] 秦南南, 武晓蓓, 张双侠. 激光熔覆增材制造研究[J]. 模具工业, 2024, 50(8): 1-7.

- [10] Khan, M.F., Damodaram, R., Altammar, H. and Karthik, G.M. (2025) Metallurgical and Mechanical Properties of Stellite 6 Deposition Developed through Friction Surfacing Technique. *Materials*, **18**, 1003-1017. <https://doi.org/10.3390/ma18051003>
- [11] 何炜, 王燕燕, 舒林森. 扫描速度对高速激光熔覆 316L 不锈钢涂层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(8): 248-253.
- [12] 吴影, 刘艳, 陈文静, 等. 超高速激光熔覆技术研究现状及其发展方向[J]. 电焊机, 2020, 50(3): 1-10+140.
- [13] 龙志武, 高延峰, 张华, 等. 工艺参数对旁轴送丝激光熔覆熔池行为的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(15): 267-274.
- [14] 高转妮, 王磊磊, 李响, 等. 7075 铝合金激光熔丝增材制造热循环和温度梯度对熔池凝固组织的影响研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(1): 96-118.
- [15] 柴蓉霞, 田妍, 周新建, 等. 回字形扫描路径下高速激光熔覆数值模拟及实验研究[J]. 中国激光, 2023, 50(8): 120-130.
- [16] 刘丽兰, 李思聪, 豆卫涛, 等. 316L 不锈钢表面激光熔覆 Ni60 合金涂层的工艺优化与性能研究[J]. 中国激光, 2024, 51(16): 118-131.
- [17] 张杰, 张群莉, 姚建华, 等. 激光熔覆 IN718 合金工艺优化及界面组织性能分析[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 204-213.
- [18] 张志虎, 孙文磊, 黄勇, 等. 高速激光熔覆和重熔复合技术制备铁基涂层的组织性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 206-213.
- [19] 华文娟, 张建勋. 激光选区熔化成形 GH3536 高温合金缺陷及质量控制[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(5): 351-358.
- [20] Sedighi, A.M., Nabavi, S.F. and Farshidianfar, A. (2024) A Review on Effect of Cooling Rate on Metallurgical, Mechanical, Geometrical Characteristics and Defects of Laser Cladding Process. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, **11**, 677-742. <https://doi.org/10.1007/s40516-024-00254-9>
- [21] 陈达, 章轩, 赵圣斌, 等. 基于深度学习的激光熔覆层表面缺陷识别研究[J]. 光学学报, 2025, 45(9): 193-203.
- [22] Sun, W., Zhang, D., Chen, X., Wang, K., Zhang, J. and Jia, Y. (2022) Effect of the Scanning Speed of Laser Cladding on Microstructure and Mechanical Properties of WC/Ni Composite Coatings. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **36**, 679-687. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0115-9>