

激光表面改性技术

基于田口-灰色关联法的 Ni60+WC
激光熔覆涂层工艺参数优化姚鑫宇¹, 林强¹, 丁昊昊^{1*}, 王文健¹, 郭俊¹, 祝毅², 甘露³

(1.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所, 成都 610031;

2.浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310058;

3.成都青石激光科技有限公司, 成都 610213)

摘要: **目的** 优化 Ni60+WC 激光熔覆工艺参数, 提高熔覆层质量。**方法** 设计三因素四水平正交试验, 通过激光熔覆手段, 在 Q235 钢板表面激光熔覆 Ni60+25%WC 粉末, 并结合超景深光学显微镜和扫描电子显微镜观察熔覆层形貌。同时, 以熔覆层几何形貌和气孔率作为优化目标, 评估工艺参数对其的影响。结合灰色关联理论, 对熔覆层最佳工艺参数进行预测, 并进行试验验证。**结果** 优化后的熔覆层主要以胞状晶为主, 且熔覆层和基体形成了良好的冶金结合。采用田口-灰色关联法对激光熔覆工艺参数进行优化, 极大地减少了试验次数 (从 64 次减少到 16 次)。灰色关联度的预测值 (0.626 553) 与试验验证值 (0.672 659) 有较高的吻合度, 误差仅为 7%。优化后的工艺参数组合为激光功率 1 100 W, 扫描速度为 10 mm/s, 送粉速率为 7.6 g/min。优化后的熔覆层宽度增加了 22% (1 949 μm 增加到 2 383 μm), 稀释率降低了 58% (24.42%降低至 10.33%), 优化后的稀释率更接近目标值 10%。同时, 气孔率也降低了 7% (0.329%降低至 0.306%)。优化后的熔覆层润湿角仍小于 70°, 符合优化目标。**结论** 田口-灰色关联法能极大地减少试验次数, 并较为准确地实现激光熔覆工艺参数的预测优化, 有效提高熔覆层的质量, 为解决复杂多响应问题的参数优化提供了一种有效手段。

关键词: 激光熔覆; 镍基 WC; 工艺参数优化; 田口-灰色关联法; 信噪比分析; 几何形貌; 气孔率

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)11-0394-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.11.034

Optimization of Process Parameters of Ni60+WC Laser Cladding
Coating Based on Taguchi-Grey Relation MethodYAO Xin-yu¹, LIN Qiang¹, DING Hao-hao^{1*}, WANG Wen-jian¹, GUO Jun¹, ZHU Yi², GAN Lu³

(1. Tribology Research Institute, State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Chengdu Qingshi Laser Technology Co., Ltd., Chengdu 610213, China)

收稿日期: 2022-09-29; 修订日期: 2023-02-13

Received: 2022-09-29; Revised: 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金 (52205578); 四川省区域创新合作项目 (2022YFQ0113); 载运工具与装备教育部重点实验室开放课题 (KLCE2021-10)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52205578); Sichuan Science and Technology Program (2022YFQ0113)

引文格式: 姚鑫宇, 林强, 丁昊昊, 等. 基于田口-灰色关联法的 Ni60+WC 激光熔覆涂层工艺参数优化[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 394-405.

YAO Xin-yu, LIN Qiang, DING Hao-hao, et al. Optimization of Process Parameters of Ni60+WC Laser Cladding Coating Based on Taguchi-Grey Relation Method[J]. Surface Technology, 2023, 52(11): 394-405.

*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: Laser cladding is a new surface modification technology. It has the characteristics of fast cooling rate, small heat affected zone, wide powder selection range and high degree of automation. Cladding parameters have a significant impact on the geometric morphology and porosity of the cladding layer, which is an important factor affecting the quality of the cladding layer. At present, the researches on laser cladding process parameters are mainly based on the experiments to improve the mechanical properties of the cladding layer. However, there are few studies on optimizing the porosity and improving the quality of cladding layer. Moreover, the statistical analysis is also needed. Therefore, in the present study, Taguchi-Grey relation method was used to systematically analyze the effect of the cladding parameters, and the cladding parameters of Ni60+25%WC were optimized.

The substrate (Q235) was cut into 100 mm × 100 mm × 10 mm square plates, and the MobiMRO fiber laser was used for this study. After the experiment, the sample was cut with wire cutting and polished. Finally, the sample was corroded with aqua regia. Taguchi method was used in the present study to design a three-factor and four-level orthogonal experiment, which greatly reduced the number of the experiments (from 64 to 16) and reduced the experiment cost. At the same time, the cross section geometry, porosity and microstructure of the cladding layer were observed by the optical microscope and scanning electron microscope. The cladding width, the cladding height, the area of the cladding layer, the area of the cladding depth, the pore area and the grain size of the cladding layer were measured by the VHXAnalyzer software and PhenomImageViewer software. With the geometry (cladding width, cladding height, dilution ratio) and the porosity of the cladding layer as the response indexes, the effects of the specific energy and the powder feeding rate on the cladding width, the cladding height, the dilution ratio and the porosity were analyzed. Then, combined with the signal-to-noise ratio analysis, the effect degree of process parameters (laser power, scanning speed, powder feeding rate) on different response indexes was explored. After that, the optimal combination of process parameters was obtained through the grey relation analysis and verified by experiments. Finally, the microstructure of different parts of the cladding layer was compared and analyzed.

The laser power had the greatest effect on the cladding width and the porosity of the cladding layer, and the scanning speed had the greatest effect on the cladding height and the dilution ratio of the cladding layer. Increasing the energy input properly could obtain larger molten pool and increase the existence time of the molten pool. It would increase the cladding width and reduce the porosity. The optimized combination of laser cladding parameters included: the laser power of 1 100 W, the scanning speed of 10 mm/s and the powder feeding rate of 7.6 g/min. At this time, the cladding layer was mainly cellular crystal and formed a great metallurgical bond with the substrate. Moreover, the cladding layer had no obvious defects such as pores and cracks, and the wetting angle was smaller than 70°, which met the optimization goal. Moreover, the cladding width increased by 22% (increased from 1 949 μm to 2 383 μm). The dilution ratio is reduced by 58% (reduced from 24.42% to 10.33%), which was closer to the ideal value of 10%. At the same time, the porosity also decreased from 0.329% to 0.306%, with a decrease of 7%. The experiment value (0.672 659) of grey correlation degree was in good agreement with the predicted value (0.626 553), with an error of 7%. At the same time, the grain size of the lower part of the cladding layer was the smallest (3.64 μm), followed by that of upper part of the cladding layer (4.39 μm), and the grain size in the middle of the cladding layer was the largest (5.52 μm). Moreover, the increase of the laser power will cause more WC particles in the cladding layer to dissolve.

KEY WORDS: laser cladding; nickel based WC; parameter optimization; Taguchi-grey relation method; signal to noise ratio analysis; geometric morphology; porosity

激光熔覆技术是一种新兴的表面改性和零件加工再制造技术,其利用高能激光束辐照基材表面,使基材快速熔化形成熔池。当激光束移开后,熔池迅速凝固,具有冷却速率大、对基材热影响小、自动化程度高等优点^[1-2],在航空航天^[3-5]、铁路^[6-7]、船舶^[8-9]等领域有着巨大的应用潜力。然而,由于影响激光熔覆过程的因素较多,反应较为复杂,因此激光熔覆涂层的质量稳定性较差。另外,由于激光熔覆过程冷却速率较快,基体和熔覆层的热膨胀系数差异较大,使

得熔覆层容易产生气孔等缺陷,极大限制了激光熔覆技术的推广,成为激光熔覆技术广泛应用不得不克服的问题。为了提高熔覆层的表面质量和性能,国内外许多学者针对激光熔覆工艺参数开展了大量研究。

杨凯新等^[10]结合田口-灰色关联法,将熔宽、熔高、稀释率作为响应目标,对激光熔覆工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉速率)进行了优化。结果表明,优化后熔宽增加了 0.2 mm,熔高增加了 0.49 mm,稀释率减小了 0.213,且灰色关联度的预测值和试验

值吻合度达到 94%，验证了田口-灰色关联法的可靠性。于天彪等^[11]采用灰色关联度分析，将熔宽、熔高、熔深作为输出，对工艺参数（激光功率、扫描速度、送粉速率）进行了优化。结果表明，优化后的熔宽（1 000 μm 以上）、熔高（小于 350 μm ）与预期（熔宽为 1 120 μm ，熔高为 300 μm ）相近，具有较高的实践性。马群双等^[12]利用宽束激光在 Q550 钢表面制备了 Ni60/WC 复合熔覆层。结果表明，激光功率对熔覆层 WC 颗粒界面析出相有较大影响。当激光功率大于 2.8 kW 时，熔覆层抗剪强度达到 279.8 MPa，超过 Q550 基材的 75%，表现出了优异的抗剪强度。Rodrigues 等^[13]研究了激光熔覆工艺参数对熔覆层几何形貌的影响。结果表明，激光功率和扫描速度的增加会导致稀释区域增加，并且扫描速度和送粉量对熔深影响强烈。Lian 等^[14]采用多响应灰色关联分析来确定激光熔覆最佳工艺参数，对熔覆层平坦度和熔覆效率进行同时优化。结果表明，搭接率对熔覆层平坦度影响最大，激光功率对熔覆效率影响最大。验证试验结果与预测值误差为 0.97%，证明了田口灰色关联法在激光熔覆工艺参数优化中的优势。Zeng 等^[15]在 AlSi5Cu1Mg 合金表面激光熔覆 Ni60+25%WC 复合粉末，以提高材料的耐磨性能。结果表明，碳化物的生成使熔覆层显微硬度较基材提高了 9~11 倍。同时，熔覆层表现出了较高的腐蚀电位（-318.09 mV）和较低的腐蚀电流密度（12.33 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ），有较好的耐腐蚀性能。

通过以上分析可以看出，目前的研究主要集中于探究工艺参数对熔覆层硬度、耐磨性能等方面的影响，而基于统计学分析的关于改善熔覆层气孔等缺陷方面的研究较少。在激光熔覆的过程中，熔覆层内部缺陷对熔覆层性能有较大影响。基于此，本文采用田口法，探究了影响熔覆层几何形貌和气孔率的主要因素。同时，结合灰色关联度理论，预测了最佳工艺参数组合，同时优化熔覆层几何形貌与气孔率，并通过试验验证了预测结果的准确性，在多个响应目标下实现了对多个参数的优化。

1 试验

1.1 设备及材料

试验所用设备为 MMRO-2 移动式激光熔覆设备，设备采用同轴送粉方式送粉，粉末焦点距离为 11 mm。激光器功率范围在 400~4 000 W，激光波长为 1 080 nm，聚焦距离为 200 mm。试验过程中，为防止高温氧化，采用氩气作为保护气和送粉气。熔覆过程中，激光束通过光纤传输至激光头中心射出，并与激光头旁路送出的粉末汇聚于一点，通过机械臂带动激光头运动，在基材表面形成熔道，机械臂的重复定位精度为 0.01 mm。设备原理如图 1 所示。

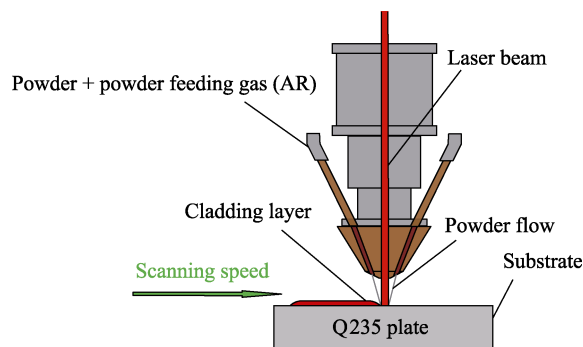


图1 激光熔覆原理

Fig.1 Schematic diagram of laser cladding

本研究采用机械零部件常用材料 Q235 钢板作为基材，通过在其表面激光熔覆镍包 WC 球形粉末（Ni60+25%WC）以提高其耐磨性能。基材尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm，其化学成分见表 1，激光熔覆粉末粒径为 53~150 μm ，熔覆粉末化学成分见表 2。

表1 基材化学成分

Tab.1 Chemical composition of the substrate

Elements	C	Mn	Si	S	P	Fe
Content/%	0.19	1.2	0.3	0.005	0.045	Bal.

表2 粉末化学成分

Tab.2 Chemical composition of powder

Elements	C	Cr	Si	B	Fe	WC	Ni
Content/%	0.8	16.5	4.00	4.00	<8.00	25	Bal.

1.2 方法

试验前，将粉末在 100 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 1 h 备用。同时，用 180 目砂纸打磨基材表面，以去除氧化膜。然后用酒精将基材表面清洗干净并烘干。本研究设计了三因素四水平正交试验，试验因素和水平见表 3。由于本试验设备只能通过改变粉盘转速来调节送粉速率。因此，试验前分别收集了不同水平粉盘转速下 1 min 送出的粉末，并用电子天平称量其质量，进而将粉盘转速转变为送粉速率。试验过程中，送粉气流量保持 4 L/min 不变，保护气流量为 8 L/min，光斑直径为 3 mm。试验后，用线切割在熔道中部沿垂直于扫描速度方向取 3 mm 厚的试样，并用目数由小到大的砂纸打磨至 2 000 目，而后进行抛光处理。采用超景深光学显微镜（OM）观察熔覆层横截面形貌及缺陷，并用其自带软件测量熔覆层横截面几何尺寸（熔覆层高度、熔覆层宽度、熔覆层面积、熔深面积）及缺陷尺寸（气孔面积），测量方法如图 2 所示。其中， W 为熔覆层宽度， H 为熔覆层高度， S_C 为熔覆层面积， S_M 为熔深面积， S_P 为气孔面积， θ 为润湿角。然后用王水腐蚀 30 s，用扫描电镜（SEM）观察熔覆层的微观组织。

表 3 激光熔覆正交试验各参数水平
Tab.3 Parameter level of laser cladding
orthogonal experiment

	Laser power/W	Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Feeding rate/(g·min ⁻¹)
Level 1	1 000	5	4.6
Level 2	1 100	10	6.0
Level 3	1 200	15	7.6
Level 4	1 300	20	9.1

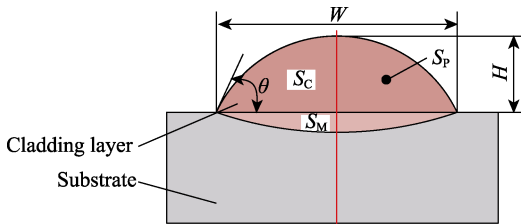


图 2 熔覆层几何尺寸测量
Fig.2 Geometric dimension measurement
of cladding layer

2 结果及讨论

熔覆层几何形貌(熔宽、熔高、稀释率)对熔覆层表面质量及结合性能(表面平整度、结合强度等)有着重要影响。同时,熔覆层的气孔率对熔覆层性能有重要影响,较高的气孔率不仅影响熔覆层的致密程度,同时会影响熔覆层的耐腐蚀性能,并产生应力集中,容易萌生裂纹^[16]。因此,为提升熔覆层质量,本研究选择熔宽(W)、熔高(H)、稀释率(η)、气

孔率(φ)为响应指标,研究了工艺参数对熔覆层几何形貌和气孔率的影响。其中,熔宽和熔高通过直接测量得到,稀释率和气孔率分别通过式(1)、式(2)计算得到。熔覆层横截面几何形貌和气孔率的测量和计算结果见表 4。

$$\eta = \frac{S_M}{S_C + S_M} \tag{1}$$

$$\varphi = \frac{S_P}{S_C + S_M} \tag{2}$$

2.1 工艺参数对熔覆层几何形貌的影响

比能量反应了单位面积的能量辐照,可以通过式(3)计算得到,是激光功率、扫描速度与光斑直径共同作用的结果,能够衡量激光熔覆过程中的能量密度。送粉速率 F 与比能量 E 对熔覆层几何形貌的影响如图 3 所示。其中,图 3a 为送粉速率与比能量对熔覆层宽度的影响。可以看出,当送粉速率相同时,随着比能量的增大,熔覆层宽度变大。这是由于当送粉速率相同时,随着比能量的增加,辐照到基材表面的能量变大,使得基材表面形成的熔池面积变大,且熔化进入熔池的粉末变多,进而熔覆层宽度增加。当比能量相近时,在较小的比能量(小于 50 J/mm²)下,随着送粉速率的增加,熔覆层宽度减小;在比能量较大时(大于 50 J/mm²),熔覆层宽度随送粉速率的增加而增加。这是因为在比能量较小时,激光能够熔化的粉末量接近极限,而随着送粉速率的继续增大,粉末吸收的能量变多,使得基材表面接收的能量减小,且熔化进入熔池形成熔覆层的粉末量基本不变,因此

表 4 单道激光熔覆正交试验熔覆层横截面几何尺寸
Tab.4 Cross sectional geometric dimension of cladding layer in single track laser cladding orthogonal experiment

No.	Laser power/W	Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Feeding rate/(g·min ⁻¹)	Cladding width/μm	Cladding height/μm	Dilution ratio/%	Porosity/%
1	1 000	5	4.6	2 292	733	18.646 1	0.634 04
2	1 000	10	6	2 261	705	11.910 5	0.268 48
3	1 000	15	7.6	2 201	441	19.912 0	1.575 54
4	1 000	20	9.1	1 931	400	26.852 7	1.934 79
5	1 100	5	6	2 362	689	28.369 1	1.381 44
6	1 100	10	4.6	2 372	718	14.592 9	1.011 44
7	1 100	15	9.1	2 147	481	24.407 1	0.163 21
8	1 100	20	7.6	1 949	320	24.422 8	0.329 06
9	1 200	5	7.6	2 533	776	22.724 5	1.314 21
10	1 200	10	9.1	2 507	772	11.610 2	3.663 62
11	1 200	15	4.6	2 209	522	17.435 1	4.143 28
12	1 200	20	6	2 286	331	38.395 8	2.241 88
13	1 300	5	9.1	2 852	916	21.815 2	9.076 10
14	1 300	10	7.6	2 753	662	22.505 0	4.537 01
15	1 300	15	6	2 388	561	19.435 3	1.991 63
16	1 300	20	4.6	2 398	383	42.371 4	0.587 95

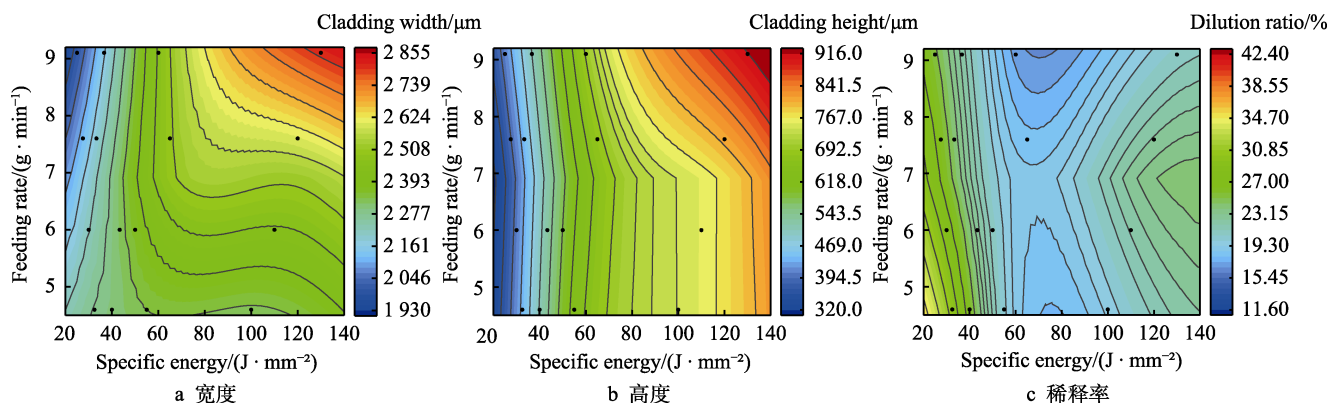


图3 送粉速率与比能量对熔覆层几何尺寸的影响

Fig.3 Effect of powder feeding rate and specific energy on the geometric dimension of cladding layer: a) width; b) height; c) dilution ratio

熔覆层宽度减小。当比能量较大时,送粉速率的增加使得熔化进入熔池的粉末变多,使得形成的熔覆层宽度变大。

$$E = \frac{P}{S \cdot D} \quad (3)$$

式中: E 为比能量; P 为激光功率; S 为扫描速度; D 为光斑直径, 本研究中 D 的值为 3 mm。

图 3b 为比能量与送粉速率对熔覆层高度的影响。可以看出, 在相同的送粉速率下, 随着比能量的升高, 熔覆层高度变大。不难理解, 比能量的增加会使得更多粉末熔化进入熔池, 而后凝固形成熔覆层, 因而会使熔覆层高度增加。在较小的比能量 (小于 50 J/mm²) 下, 熔覆层高度随着送粉速率的增加略有降低。这是因为, 在比能量较小时, 随着送粉速率的增加, 没有足够的能量来熔化更多的粉末, 并且使辐照到基材表面的能量减小, 所形成的熔池面积减小。这就导致能够进入熔池的粉末变少, 形成的熔覆层变小, 进而使得熔覆层高度降低。当比能量较高时 (大于 50 J/mm²), 熔覆层高度随着送粉速率的增加而增加。这是由于当比能量较高时, 能够熔化的粉末量更多。因此, 随着送粉速率的增加, 会有更多粉末熔化进入熔池, 使得熔覆层高度增加。

比能量 E 与送粉速率 F 对稀释率的影响如图 3c 所示。不难看出, 当送粉速率相同时, 稀释率随着比能量的增加先减小后增大。这是由于比能量的增加一方面使得更多粉末进入熔池形成熔覆层, 导致熔覆层面积变大。另一方面, 比能量的增加会形成更深的熔池, 使熔深面积变大。二者的竞争关系使得稀释率先减小后增大。当比能量相近时, 随着送粉速率的增加, 稀释率有减小的趋势。不难理解, 当比能量相近时, 送粉速率的增加一方面会导致熔池深度降低, 另一方面会使更多粉末进入熔池形成熔覆层, 增加了熔覆层的面积, 因此使得稀释率减小。

2.2 工艺参数对熔覆层气孔率的影响

比能量与送粉速率对熔覆层气孔率的影响如图 4

所示。不难看出, 当送粉速率较小 (4.6 g/min) 时, 气孔率随着比能量的升高而减小。当送粉速率较大 (大于 4.6 g/min) 时, 气孔率随着比能量的升高而升高。在激光熔覆过程中, 熔池内部会发生剧烈的化学反应, 产生气体, 而激光熔覆是一个快热快冷的过程, 当熔池快速凝固导致气体无法从熔池及时逃逸时, 就会形成气孔^[17-19]。因此, 当送粉速率较小时, 熔池内反应物较少, 剧烈反应产生的气体总量也较少, 而比能量的适当增大会延长熔池的存在时间, 使得气体有足够的时间逃逸, 因此气孔率减小。当送粉速率较大时, 熔池内部反应产生的气体较多, 且比能量的增大加剧了熔池的反应, 进一步增加了气体的产生。此时, 尽管熔池存在的时间略有延长, 但剧烈反应产生的气体仍没有足够的逃逸时间。因此, 熔覆层气孔率增加。当比能量较小 (小于 50 J/mm²) 时, 气孔率随送粉速率的增加而略有降低, 此时气孔率对送粉速率的变化并不敏感。当比能量较大 (大于 50 J/mm²) 时, 气孔率随着送粉速率的增加而增加。这是因为当比能量较小时, 熔池内反应较弱, 产生的气体较少。送粉速率

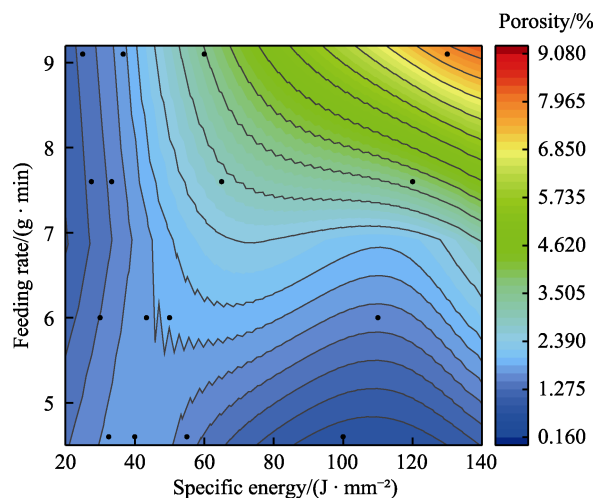


图4 送粉速率与比能量对气孔率的影响

Fig.4 Effect of powder feeding rate and specific energy on the porosity

的增加进一步削弱了熔池内的反应剧烈程度,使气孔率略有降低。当比能量较高时,熔池内部反应剧烈,而送粉速率的增加对熔池内部反应剧烈程度的削弱有限。相反,更多的粉末进入熔池使得反应物增多,产生的气体量变大。因此,在较大比能量下,熔覆层气孔率随着送粉速率的增加而增大。

2.3 田口法信噪比分析

通过以上研究可以定性分析出激光熔覆工艺参数对熔覆层几何形貌和气孔率的影响趋势,但无法得出获得最佳响应指标的工艺参数组合。因此,需结合信噪比分析(SNR)对正交试验数据进行分析处理。采用信噪比分析可以减小田口正交试验数据处理过程中的变化,有助于数据分析,并得出各因素对不同响应的影响程度,分别获得满足各优化目标的工艺参数组合,信噪比越大,说明越接近优化目标^[20-23]。信噪比分为越大越好、越小越好和名义越好,可通过公式(4)~(6)计算得出^[21]。

$$\eta_{\text{SNR}} = -10\lg\left[\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n\left(\frac{1}{y_{ijk}^2}\right)\right]$$
 (4)

$$\eta_{\text{SNR}} = -10\lg\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n y_{ijk}^2\right)$$
 (5)

$$\eta_{\text{SNR}} = -10\lg\left[\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n (y_{ijk}^2 - m)^2\right]$$
 (6)

式中: η_{SNR} 为信噪比; y_{ijk} 为试验结果; m 为目标值。

在激光熔覆过程中,较大的宽高比有利于减少气孔^[19],且当润湿角小于 70°时,在多道熔覆中能够获得更为平整的熔覆层。因此,本试验中熔宽选择越大越好,熔高选择越小越好。此外,较小的稀释率会使熔覆层与基体结合力不足,增大开裂倾向,而较大的稀释率会导致熔覆层性能下降^[12]。因此,稀释率信噪比选择名义越好进行计算,选择 10%作为稀释率的目标值。为简化分析,用式(7)对稀释率进行正向处理,使之转化为越大越好。同时,为增加熔覆层致密程度,提升熔覆层质量,气孔率信噪比选择越小越好

进行计算。
$$\eta' = 1 - |\eta - 0.1|$$
 (7)

式中: η' 为正向处理结果; η 为稀释率。
各响应目标的信噪比计算结果见表 5。其中, S/N_w 为熔覆层宽度信噪比, S/N_H 为熔覆层高度信噪比, S/N_η 为稀释率信噪比, S/N_ϕ 为气孔率信噪比。

表 5 响应目标信噪比分析
Tab.5 Signal to noise ratio analysis of response objective

No.	SNR of S/N_w	SNR of S/N_H	SNR of S/N_η	SNR of S/N_ϕ
1	67.204 292	-57.302 08	-14.588 26	43.957 648
2	67.086 011	-56.963 78	-18.481 4	51.421 809
3	66.852 401	-52.888 77	-14.017 71	36.051 436
4	65.715 645	-52.041 2	-11.420 23	34.267 339
5	67.465 598	-56.764 38	-10.943 08	37.193 376
6	67.502 294	-57.122 49	-16.717 15	39.901 153
7	66.636 641	-53.642 9	-12.249 67	55.745 23
8	65.796 237	-50.103	-12.244 09	49.654 644
9	68.072 704	-57.797 23	-12.870 1	37.626 693
10	67.983 087	-57.752 35	-18.703 23	28.721 784
11	66.883 914	-54.353 41	-15.171 49	27.653 11
12	67.181 525	-50.396 56	-8.314 327	32.987 764
13	69.102 99	-59.237 91	-13.224 83	20.842 015
14	68.7961 24	-56.417 16	-12.954 44	26.864 606
15	67.5606 86	-54.979 26	-14.228 16	34.015 821
16	67.5969 84	-51.663 98	-7.458 54	44.613 208

根据信噪比计算结果,可以得出各工艺参数对各响应目标的影响,并分别得出最有利于各响应目标的工艺参数组合,如图 5~8 所示。图中纵坐标数值为表 5 中信噪比计算值在每一水平下 4 次计算结果的平均值。图 5 为工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉速率)对熔覆层宽度信噪比的影响趋势。可以看出,随着激光功率的增加,熔覆层宽度信噪比显著增加,随着扫描速度的增加,熔覆层宽度信噪比显著降低,而送粉速率对熔覆层宽度信噪比影响不明显,这表明熔覆层宽度主要受激光功率和扫描速度的影响。要获得

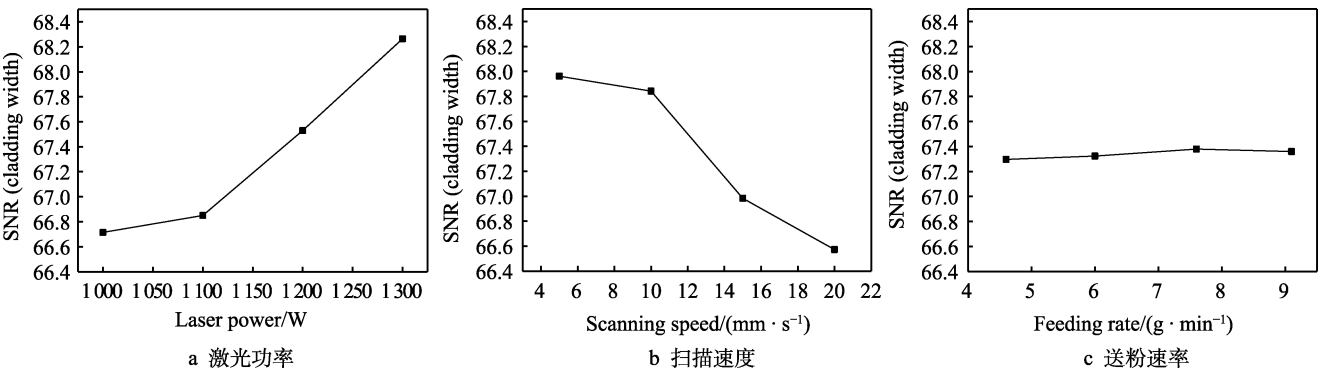


图 5 不同工艺参数对熔覆层宽度影响
Fig.5 Effect of different process parameters on the cladding layer width: a) laser power; b) scanning speed; c) feeding rate

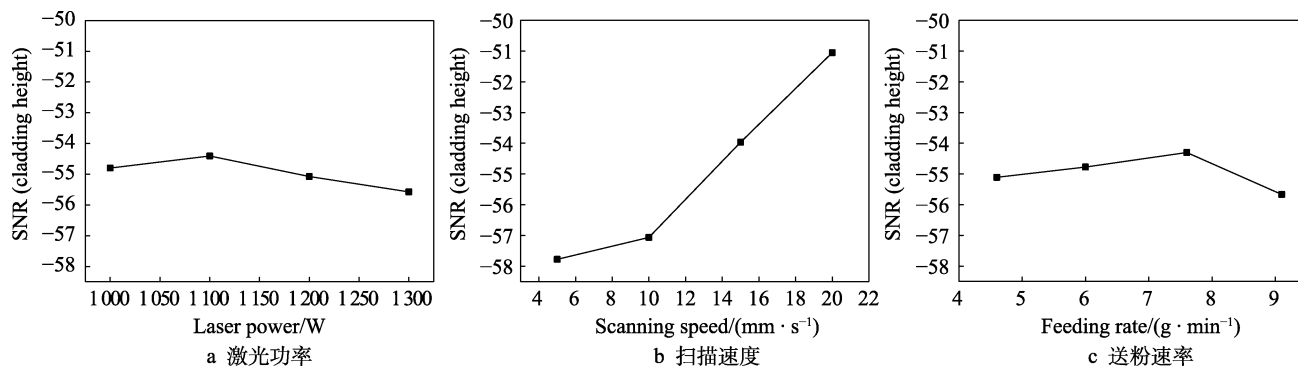


图6 不同工艺参数对熔覆层高度影响

Fig.6 Effect of different process parameters on the cladding layer height: a) laser power; b) scanning speed; c) feeding rate

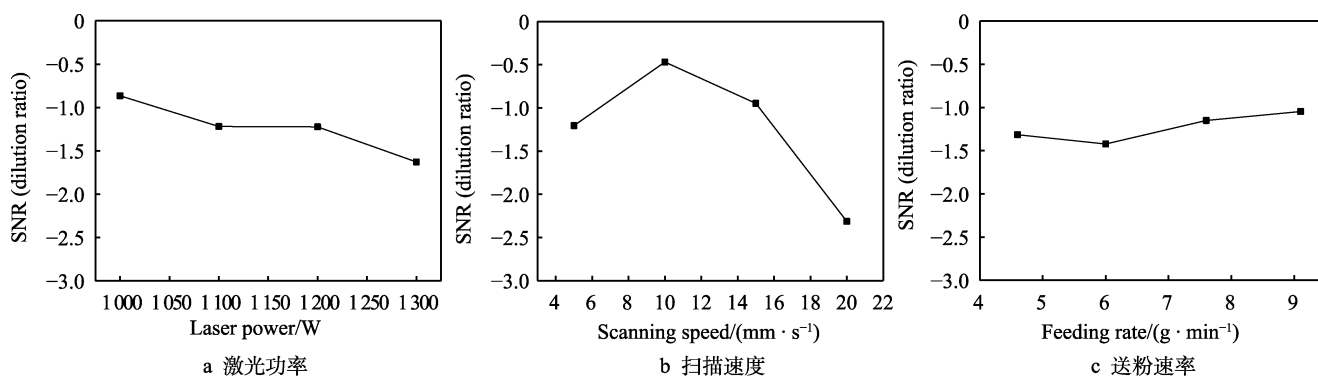


图7 不同工艺参数对稀释率影响

Fig.7 Effect of different process parameters on the dilution ratio: a) laser power; b) scanning speed; c) feeding rate

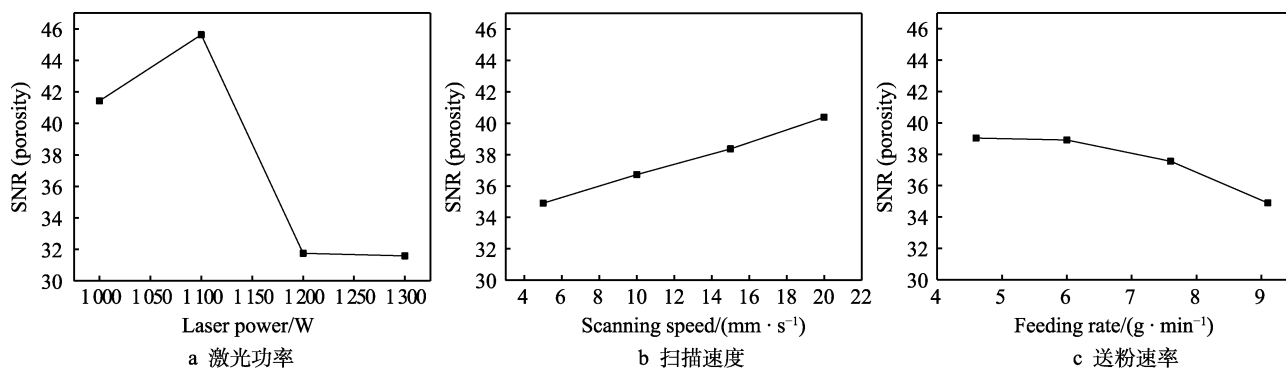


图8 不同工艺参数对气孔率影响

Fig.8 Effect of different process parameters on the porosity: a) laser power; b) scanning speed; c) feeding rate

更宽的熔覆层,可以选择较高的激光功率和较小的扫描速度。选取 P4S1F3 (激光功率为 1 300 W, 扫描速度为 5 mm/s, 送粉速率为 7.6 g/min) 这一工艺参数组合可以获得最宽的熔覆层。

工艺参数对熔覆层高度信噪比的影响如图 6 所示。不难看出,扫描速度对熔覆层高度信噪比的影响最大。随着扫描速度升高,熔覆层高度信噪比显著增加。因此,选用较大的扫描速度可以获得较小的熔覆层高度。要想得到更小的熔覆层高度,工艺参数组合应为 P2S4F3 (激光功率为 1 100 W, 扫描速度为 20 mm/s, 送粉速率为 7.6 g/min)。

工艺参数对稀释率信噪比的影响如图 7 所示。可以看出,激光功率与扫描速度对稀释率的影响较大,

而稀释率对送粉速率的变化并不敏感。随着激光功率的上升,稀释率信噪比有减小趋势,说明较小的激光功率使熔覆层稀释率更接近 10%。随着激光功率的增加,熔覆层稀释率变大,因此使得稀释率信噪比降低。扫描速度的增大使熔覆层稀释率信噪比先增大、再减小。这表明在较小的扫描速度下,熔覆层稀释率较大(大于 10%)。随着扫描速度的增加,稀释率减小,使得稀释率更接近 10%,因此稀释率信噪比增大。随着扫描速度的继续增加,熔覆层稀释率进一步减小(小于 10%),因此稀释率信噪比减小。随着送粉速率的增加,稀释率信噪比有增加趋势。这意味着在较小送粉速率下,熔覆层稀释率较大(大于 10%),送粉量的增加导致粉末吸收了更多能量,减小了熔深面

积,使得稀释率减小,更接近 10%。为了获得稀释率最接近 10%的熔覆层,工艺参数组合应选择 P1S2F4 (激光功率为 1 000 W,扫描速度为 10 mm/s,送粉速率为 9.1 g/min)。

工艺参数对熔覆层气孔率信噪比的影响如图 8 所示。可以看出,随着激光功率的增加,熔覆层气孔率信噪比先增加后减少。这是因为,当激光功率较小时,熔池存在时间较短,气体无法充分逃逸熔池。当激光功率适当增加,使得熔池存在时间变长,使得气孔率减小,气孔率信噪比增大。随着激光功率进一步增大,熔池内部反应更加剧烈,产生气体量变多,使得气孔率变大,气孔率信噪比减小。随着扫描速度增加,熔覆层气孔率信噪比增大,这意味着扫描速度的增加有利于降低气孔率。这是由于,随着扫描速度增加,熔覆层高度减小,使得气体更容易逸出。同时,送粉速率的增加使得气孔率信噪比减小。这是由于更多的粉末进入熔池使得反应物变多,产生气体量变大,增大了熔覆层气孔率。因此,为了减小熔覆层气孔率,应选择适当的激光功率,较大的扫描速度以及较小的送粉速率,即获得最小气孔率的工艺参数组合为 P2S4F1 (激光功率为 1 100 W,扫描速度为 20 mm/s,送粉速率为 4.6 g/min)。

2.4 多响应目标灰色关联分析

通过信噪比分析可以分别得到获得不同响应目标的最优工艺参数组合,但不同响应指标的最优工艺参数组合并不相同。因此,仅通过信噪比分析无法同时对熔覆层几何形貌(熔宽、熔高、稀释率)和气孔率进行优化。在此基础上,本研究结合灰色关联理论,将复杂多响应优化问题转化为对单一灰色关联度进

行优化,进而获得较大熔宽、较小熔高、合适稀释率(10%)以及较小气孔率的工艺参数组合。灰色关联分析可分为 3 个步骤:标准化处理、计算灰色关联系数和计算灰色关联度^[24-26]。由于不同响应的量纲不同,为了消除量纲的影响,通过式(8)、式(9)进行标准化处理^[27]。

$$x_i(k)(LTB) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \tag{8}$$

$$x_i(k)(STB) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \tag{9}$$

式中: $x_i(k)$ 为标准化处理结果,见表 6; $y_i(k)$ 为信噪比分析数据; $\max y_i(k)$ 和 $\min y_i(k)$ 分别为 $y_i(k)$ 的最大值和最小值。

灰色关联系数可以反映实际值与期望值之间的关联程度,灰色关联系数越大,说明越接近优化目标。灰色关联系数可以通过式(10)计算得到^[26]。

$$\xi_i(k) = \frac{\min |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max |x_0(k) - x_i(k)|} \tag{10}$$

式中: $\xi_i(k)$ 为灰色关联系数; $x_i(k)$ 为标准化处理结果; $x_0(k)$ 为信噪比的理想值,此处值为 1; ξ 为区分系数,通常取 0.5^[15]。

灰色关联分析的最后一步为计算灰色关联度 (GRG)。通过式(11)求各响应间灰色关联系数的平均值,将多个灰色关联系数整合为单一灰色关联度,灰色关联度越大,意味着优化目标越接近理想值。

$$R_{GRG} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \tag{11}$$

式中: R_{GRG} 为灰色关联度; $\xi_i(k)$ 为第 i 次试验不同响应的灰色关联系数。灰色关联度系数和灰色关联度计算结果见表 7。

表 6 响应目标标准化处理结果
Tab.6 Standardization processing results of response objective

No.	Standardizationof S/N_w	Standardizationof S/N_H	Standardizationof S/N_η	Standardizationof S/N_ϕ
1	0.439 473	0.211 915 6	0.634 0519	0.337 722
2	0.404 554 5	0.248 949	0.980 2724	0.123 868 8
3	0.335 588 9	0.695 041 1	0.583 3128	0.564 240 1
4	0	0.787 824 9	0.352 3169	0.615 355 7
5	0.516 614 8	0.270 777 2	0.309 8829	0.531 522 8
6	0.527 448	0.231 575 4	0.823 376	0.453 943 2
7	0.271 893	0.612 486 4	0.426 0797	0
8	0.023 791 9	1	0.425 5834	0.174 499 3
9	0.695 842 4	0.157 710 9	0.481 2546	0.519 108
10	0.669 386	0.162 624 9	1	0.774 239 4
11	0.344 892 2	0.534 706 9	0.685 919 6	0.804 857 7
12	0.432 751 6	0.96786 3 9	0.076 105 9	0.652 016 3
13	1	0	0.512 801 4	1
14	0.909 408	0.308 787 9	0.488 754 8	0.827 448 8
15	0.544 686 5	0.466 195 3	0.602 028 2	0.622 561 8
16	0.555 402	0.829 119 7	0	0.318 939 7

表 7 灰色关联度计算结果
Tab.7 Calculation result of grey correlation degree

No.	GRG of S/N_W	GRG of S/N_H	GRG of S/N_η	GRG of S/N_ϕ	GRG
1	0.471 463 7	0.388 173 324	0.577 401 779	0.430 189 665	0.466 807 1
2	0.456 435 3	0.399 663 978	0.962 042 398	0.363 337 461	0.545 369 8
3	0.429 401 6	0.621 149 713	0.545 442 356	0.534 325 102	0.532 579 7
4	0.333 333 3	0.702 074 55	0.435 660 343	0.565 198 885	0.509 066 8
5	0.508 447 7	0.406 761 075	0.420 126 711	0.516 274 401	0.462 902 5
6	0.514 111 3	0.394 189 775	0.738 962 838	0.477 985 515	0.531 312 4
7	0.407 130 7	0.563 371 639	0.465 583 895	0.333 333 333	0.442 354 9
8	0.338 705 6	1	0.465 368 852	0.377 215 941	0.545 322 6
9	0.621 768 7	0.372 498 002	0.490 799 775	0.509 740 101	0.498 701 6
10	0.601 964 3	0.373866678	1	0.688 932 442	0.666190 9
11	0.432 86	0.517977393	0.614 189 958	0.719 277 154	0.571 076 1
12	0.468 494 5	0.939 609 26	0.351 149 706	0.589 633 982	0.587 221 9
13	1	0.333 333 333	0.506 483 724	1	0.709 954 3
14	0.846 608 2	0.419 740 533	0.494 439 909	0.743 437 835	0.626 056 6
15	0.523 388 4	0.483 650 355	0.556 810 376	0.569 840 705	0.533 422 5
16	0.529 325 7	0.745 289 464	0.333 333 333	0.423 348 422	0.507 824 2

通过对各因素进行极差分析(见表 8)可以看出,扫描速度对灰色关联度的影响最大,激光功率次之,送粉速率对灰色关联度影响最小。工艺参数对各响应目标灰色关联度影响的主效应图见图 9。不难看出,为获得最大的灰色关联度,工艺参数组合应为 P2S2F3(激光功率为 1 100 W,扫描速度为 10 mm/s,送粉速率为 7.6 g/min)。

表 8 灰色关联度方法的响应
Tab.8 Response of grey relation method

No.	Laser power	Scanning speed	Feeding rate
1	0.564 835	0.530 691	0.549 592
2	0.587 832	0.600 902	0.557 744
3	0.549 843	0.562 158	0.578 473
4	0.560 482	0.569 241	0.577 182
Delta	0.037 989	0.070 212	0.028 881
Rank	2	1	3

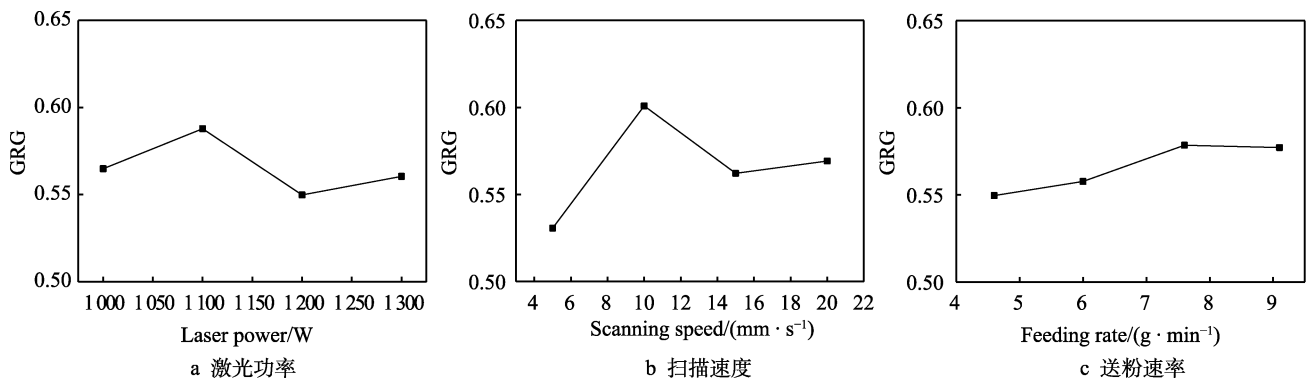


图 9 不同工艺参数对灰色关联度的影响

Fig.9 Effect of different process parameters on the grey correlation degree: a) laser power; b) scanning speed; c) feeding rate

3 实验验证

本研究结合灰色关联分析得出了最佳工艺参数组合,但所得到的最佳工艺参数组合不在正交试验中,因此需要对所得参数组合的灰色关联度进行预测以及实验验证。灰色关联度的预测值可通过式(12)计算得到^[26]。灰色关联度的预测值及试验验证结果见表 9。可以看出,试验值(0.672 659)与预测值

(0.626 553)有着较好的一致性,误差仅为 7%。与正交试验中最优结果相比,优化后的熔覆层宽度增加了 22%(由 1 949 μm 增加到 2 383 μm)。尽管优化后熔覆层高度增加,但润湿角仍小于 70°,满足优化标准^[26]。熔覆层稀释率降低了 58%(由 24.42%降低至 10.33%),优化后的稀释率更接近目标值 10%。同时,气孔率也降低了 7%(由 0.329%降低至 0.306%)。灰色关联度预测的最佳工艺参数组合所得熔覆层横截

面形貌如图 10 所示。从图 10a 可以看出, 熔覆层没有明显的气孔等缺陷, 且 WC 颗粒在熔覆层中分布较为均匀。从图 10b 可以看出, 熔覆层与基体之间有一条明显的熔合线, 说明熔覆层与基体形成了良好的冶金结合, 有着良好的结合性能。

$$R_{\text{GRGp}} = \overline{R_{\text{GRGt}}} + \sum_{i=1}^n \left(\overline{R_{\text{GRGi}}} - \overline{R_{\text{GRGt}}} \right) \quad (12)$$

式中: R_{GRGp} 为灰色关联度的预测值; $\overline{R_{\text{GRGt}}}$ 正交试验灰色关联度的平均值; $\overline{R_{\text{GRGi}}}$ 为不同响应的灰色关联度最优值; n 为因素个数, 本研究 n 的值为 3。

熔覆层横截面不同部位扫描电镜照片如图 11 所

表 9 预测结果及验证结果

Tab.9 Forecast results and verification results

Response objective	Forecast results	Verification results
Cladding width	—	2 383
Cladding height	—	702
Dilution rate	—	10.33%
Porosity	—	0.31%
GRG	0.626 553	0.672 659

示。可以看出, 熔覆层上部、中部、下部都主要为胞状晶。对熔覆层不同部位分别取 5 张照片, 按图 11 中方法可分别测算出熔覆层不同部位平均胞状晶直径 d 。其中, 熔覆层上部胞状晶平均直径为 $4.39\text{ }\mu\text{m}$, 熔覆层中部平均胞状晶直径为 $5.52\text{ }\mu\text{m}$, 熔覆层底部平均胞状晶直径为 $3.64\text{ }\mu\text{m}$ 。可以看出, 熔覆层底部胞晶直径最小, 熔覆层上部次之, 熔覆层中部晶粒尺寸最大。这是由于熔池内冷却速度不同导致的。在熔池底部, 散热方式主要为与基材之间的热传导, 熔覆层上部主要通过空气的热对流进行散热。因此, 熔覆层底部及上部冷却速度较大, 这使得晶核没有足够的生长时间, 起到了细化晶粒的作用。与熔覆层底部和上部散热方式不同, 熔覆层中部保温效果较好, 冷却速度较慢。因此, 熔覆层中部晶粒尺寸较大。

熔覆层 WC 颗粒边缘形貌如图 12 所示。可以看出, WC 颗粒边缘形成了白色垂直于 WC 边界呈放射状分布的条状及颗粒状组织。这是由于 WC 作为非均质形核点, 其温度低于熔池温度, 使得其周围形成局部温度梯度。在熔池凝固时, WC 周围形成微区定向冷却^[27], 形成了垂直于 WC 边界生长的白色条状组织。同时, 从图 11 可以看出, 熔覆层不同部位均发

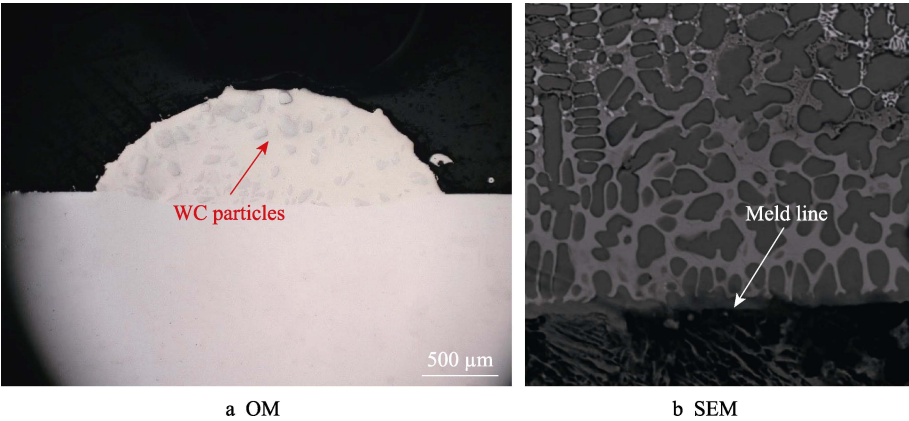


图 10 最佳参数熔覆层横截面形貌

Fig.10 Cross section morphology of cladding layer with optimum parameters

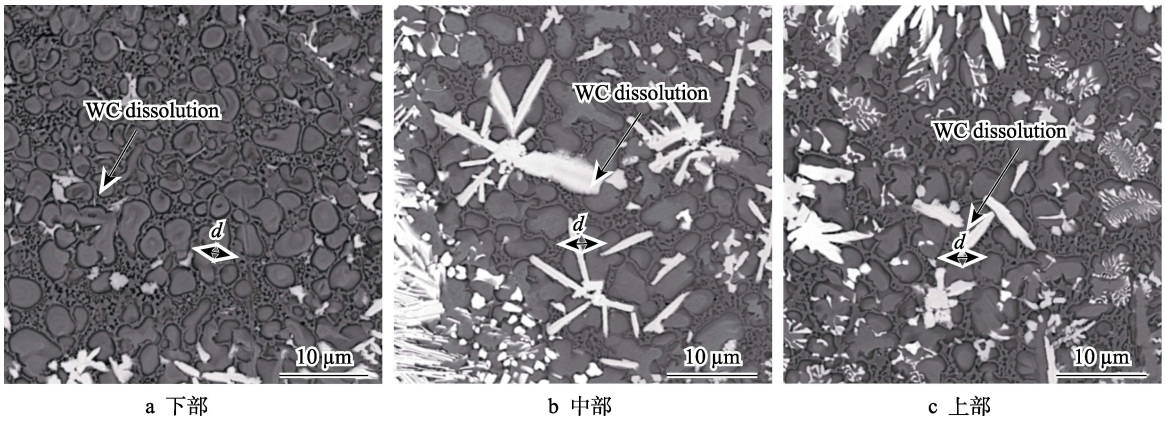


图 11 最佳参数下熔覆层不同部位组织形貌

Fig.11 Microstructure of different parts of the cladding layer under the optimal parameters: a) lower part; b) middle part; c) upper part

生了 WC 溶解, 形成了大量白色条状物。从熔覆层 X 射线衍射图谱 (图 13) 可以看出, 熔覆层主要衍射峰为 γ -(Ni, Cr, Fe) 固溶体。因此, γ -(Ni, Cr, Fe) 固溶体为熔覆层基体相, 起到固溶强化的作用。同时, 熔覆层还存在 WC、 W_2C 、 Cr_7C_3 、 Ni_4B_3 、 $M_{23}C_6$ 等相。其中, M 代表 Fe、Cr 等。

对图 11b 中灰色部分 (S1) 和白色条状物 (S2) 进行 EDS 能谱点分析, 结果见表 10。可以看出, 灰色部分 S1 点的 Ni 和 Fe 元素含量较高, 因此可以推断该部分为 γ -(Ni, Cr, Fe) 基体相。同时, 在基体相中检测到了 W 元素, 说明 W 元素能够溶解到 γ -(Ni, Cr, Fe) 基体相中。S2 点处的主要元素为 C、Cr、Fe、Ni、W 等, 结合 XRD 检测结果可以推测, 白色条状物为

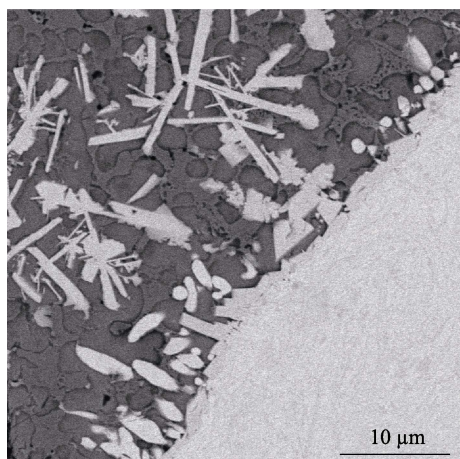


图 12 WC 颗粒边缘形貌
Fig.12 Edge morphology of WC particles

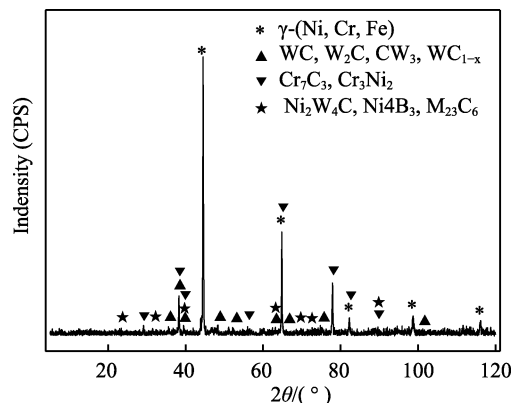


图 13 Ni60+25%WC 熔覆层 X 射线衍射谱
Fig.13 XRD spectra for the Ni60+25%WC cladding layer

WC 溶解物, 并在高温下与基体相反应, 形成了以 W_2C 、 Cr_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 等相为主的碳化物。对比较高功率 (1 300 W) 下 WC 的溶解行为发现 (如图 14 所示), 优化后的工艺参数所得熔覆层中, WC 的溶解物较少。WC 作为耐磨陶瓷相, 其溶解会导致熔覆层耐磨性能下降^[28]。因此, 优化后的工艺参数能够获得力学性能更优的熔覆层。

表 10 Ni60+25%WC 熔覆层化学成分
Tab.10 Chemical composition of the Ni60+25%WC cladding layer

	at. %						
Analysis spot	B	C	Si	Cr	Fe	Ni	W
S1	8.34	28.22	2.76	2.18	10.69	46.44	1.36
S2	8.01	43.83	0.25	4.88	4.30	19.70	19.03

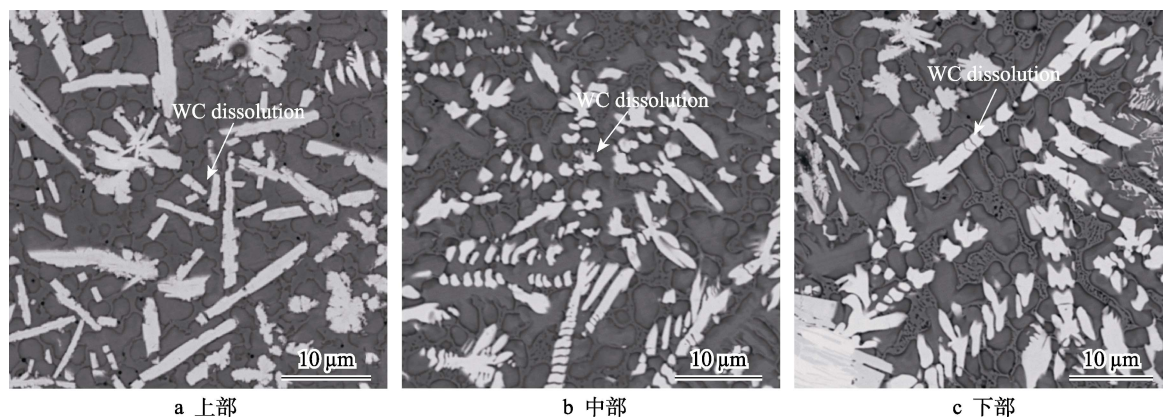


图 14 1 300 W 熔覆层不同部位组织形貌
Fig.14 Morphology of different parts of the cladding layer under 1 300 W: a) lower part; b) middle part; c) upper part

4 结论

1) 分析了送粉速率与比能量对熔覆层几何形貌 (熔宽、熔高、稀释率) 和气孔率的影响, 结果表明, 随着比能量的增大, 熔覆层宽度和熔覆层高度变大, 而稀释率先减小后增大。同时, 在较小的比能量 (小

于 50 J/mm²) 下, 送粉速率的增加会导致熔覆层宽度和高度减小。当比能量较大 (大于 50 J/mm²) 时, 熔覆层宽度和高度随送粉速率的增加而增加, 而稀释率随着送粉速率的增加有减小的趋势。对于气孔率来说, 较大的送粉速率 (大于 4.6 g/min) 和较大的比能量 (大于 50 J/mm²) 会导致较大的气孔率。

2) 结合信噪比分析可知, 激光功率对熔覆层宽度和气孔率影响最大, 扫描速度对熔覆层高度和稀释率影响最大。

3) 灰色关联分析表明, 扫描速度对灰色关联度影响最大, 激光功率次之, 送粉速率影响最小。同时, 优选出的工艺参数组合为 P2S2F3 (激光功率为 1 100 W, 扫描速度为 10 mm/s, 送粉速率为 7.6 g/min)。

4) 灰色关联度的试验值 (0.672 659) 与预测值 (0.626 553) 有较好的吻合度, 误差为 7%, 能够作为多因素参数优化的有效手段。

参考文献:

- [1] 戴德平, 蒋小华, 蔡建鹏, 等. 激光熔覆 Inconel718 镍基合金温度场与应力场模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 121-128.
DAI De-ping, JIANG Xiao-hua, CAI Jian-peng, et al. Numerical Simulation of Temperature Field and Stress Distribution in Inconel718 Ni Base Alloy Induced by Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 121-128.
- [2] YONG Yao-wei, FU Wei, DENG Qi-lin, et al. A Comparative Study of Vision Detection and Numerical Simulation for Laser Cladding of Nickel-Based Alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 28: 364-372.
- [3] SIBISI P N, POPOOLA A P I, KANYANE L R, et al. Microstructure and Microhardness Characterization of Cp-Ti/SiAlON Composite Coatings on Ti-6Al-4V by Laser Cladding[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 35: 272-277.
- [4] FATOBA O S, ADESINA O S, POPOOLA A P I. Evaluation of Microstructure, Microhardness, and Electrochemical Properties of Laser-Deposited Ti-Co Coatings on Ti-6Al-4V Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5): 2341-2350.
- [5] 郭红丽, 李勇. 激光熔覆制备 Ni60-WC-Co 复合涂层工艺与性能研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(12): 184-190.
GUO Hong-li, LI Yong. Study on Technology and Performance of Ni60-WC-Co Composite Coating Prepared by Laser Cladding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(12): 184-190.
- [6] FU Z K, DING H H, WANG W J, et al. Investigation on Microstructure and Wear Characteristic of Laser Cladding Fe-Based Alloy on Wheel/Rail Materials[J]. Wear, 2015, 330-331: 592-599.
- [7] ALADESANMI V, FATOBA O, AKINLABI E. Laser Cladded Ti + TiB₂ on Steel Rail Microstructural Effect[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 33: 709-716.
- [8] RIQUELME A, ESCALERA-RODRÍGUEZ M D, RODRIGO P, et al. Laser Cladding of *In Situ* Al-AlN Composite on Light Alloys Substrate[J]. Key Engineering Materials, 2016, 724: 66-70.
- [9] SMOLEŃSKA H, ŁABANOWSKI J, KOŃCZEWICZ W. Regeneration of Marine Engine Valves Using Laser Surfacing[J]. Welding International, 2016, 30(2): 103-106.
- [10] 杨凯欣, 孙文磊, 肖奇, 等. 基于田口灰色关联法对 Fe06-15%TiC 熔覆层激光工艺参数优化[J]. 材料导报, 2022, 36(24): 182-190.
YANG Kai-xin, SUN Wen-lei, XIAO Qi, et al. Laser Process Parameters of Fe06-15%TiC Cladding Layer were Optimized Based on Taguchi Grey Correlation Method[J]. Materials Reports, 2022, 36(24): 182-190.
- [11] 于天彪, 宋博学, 郝文超, 等. 激光熔覆工艺参数对熔覆层形貌的影响及优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 537-542.
YU Tian-biao, SONG Bo-xue, XI Wen-chao, et al. Influence of Laser Cladding Process Parameters on Morphology of Cladding Layer and Its Optimization[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(4): 537-542.
- [12] 马群双, 李亚江, 王娟, 等. 宽束激光熔覆 Ni60/WC 复合层显微组织及抗剪强度[J]. 焊接学报, 2016, 37(12): 49-52.
MA Qun-shuang, LI Ya-jiang, WANG Juan, et al. Microstructure Characteristics and Shear Strength of Wideband Laser Clad Ni60 Composite Coatings Reinforced with WC Particle[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(12): 49-52.
- [13] APOLINÁRIO L H R, TORRES E A, ARAÚJO H R, et al. Effect of Laser Cladding Parameters in NbC Reinforced 316L Austenitic Stainless Steel Composite Depositions on a Mild Steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(7/8): 3095-3113.
- [14] LIAN Guo-fu, ZHANG Hao, ZHANG Yang, et al. Optimizing Processing Parameters for Multi-Track Laser Cladding Utilizing Multi-Response Grey Relational Analysis[J]. Coatings, 2019, 9(6): 356.
- [15] ZENG Min, YAN Hong, YU Bao-biao, et al. Microstructure, Microhardness and Corrosion Resistance of Laser Cladding Ni-WC Coating on AlSi₅Cu₁Mg Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(9): 2716-2728.
- [16] 张佳虹, 孙荣禄. 激光熔覆 Ni 基复合涂层气孔及裂纹敏感性的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 141-144.
ZHANG Jia-hong, SUN Rong-lu. Research on Porosity and Cracking Sensitivity of Ni-Based Composite Coating by Laser Cladding[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(4): 141-144.
- [17] ZHONG Chong-liang, GASSER A, KITTEL J, et al. Improvement of Material Performance of Inconel 718 Formed by High Deposition-Rate Laser Metal Deposition[J]. Materials & Design, 2016, 98: 128-134.
- [18] ZHANG Nan, LIU Wei-wei, DENG De-wei, et al. Effect of Electric-Magnetic Compound Field on the Pore Distribution in Laser Cladding Process[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 247-254.

(下转第 465 页)