

NATURAL

陕西理工大学学报

JOURNAL OF SHAANXI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

自然科学版
Natural Science Edition

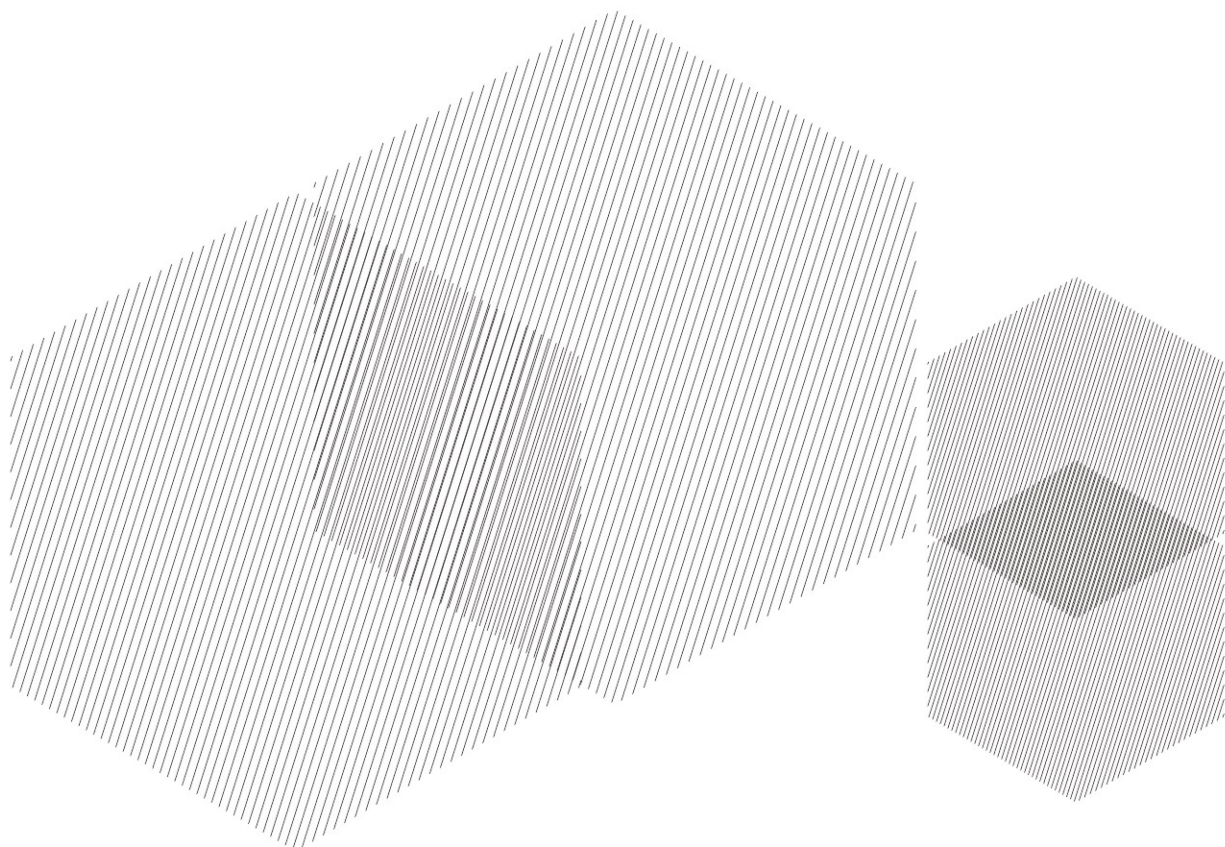
1

2023

2023年2月

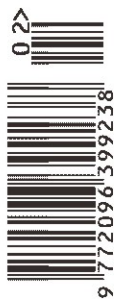
双月刊 / 第39卷 / 第1期

中国·汉中
HANZHONG CHINA



CODEN SGXZES

ISSN 2096-3998



《中国核心期刊（遴选）数据库》收录期刊
万方数据资源系统数字化期刊群数据库
中国期刊网《中国学术期刊(光盘版)》数据库
《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊
《中国学术期刊综合评价数据库》(CAJCED) 来源期刊
《中国期刊全文数据库》(CJFD) 收录期刊
《中文科技期刊数据库》收录期刊
中国科技论文在线来源期刊
《超星期刊域出版系统》全文收录期刊

陕西理工大学学报

自然科学版(双月刊)

2023 年 2 月

第 39 卷第 1 期

目 次

Inconel 718 高温合金单层多道激光熔覆成形工艺优化	王聪,陈建刚,彭彦龙,等	(1)
流热固耦合下螺杆压缩机转子拓扑优化	王凯,何亚银,张炜,等	(10)
不同转速下载荷对轴流压气机叶片变形的影响	刘志远,王军利,张宝升	(18)
高压直流电缆绝缘材料聚丙烯改性研究综述	陈少杰,惠卓斌,李欢	(27)
降雨条件下的非饱和有限土体主动土压力分析	王宁,李亚云,张波,等	(37)
基于改进 YOLOv5 的舰船目标检测	钟友闻,车文刚	(42)
基于 SWT 和 DCT 的音频水印算法	齐燕博,杜庆治,龙华,等	(51)
基于类耦合关系的微服务拆分方法	刘若宇,刘晓燕	(60)
三台带两个服务等级的并行机排序问题算法研究	吴兆蕊,陈智斌,王扬	(67)
阻尼 Schrödinger 方程和板方程解的能量指数衰减	白忠玉,陈娜娜	(73)
谱投影梯度算法求解绝对值方程最小 1 范数解	王爱祥	(80)
体育旅游 SWOT-AHP 定量模型构建与发展策略分析——以成都西岭雪山景区为例	张真静,胡乔,廖梅洁	(86)
陕西理工大学重点学科系列介绍·化学学科		(封二)

期刊基本参数:CN 61-1510/N * 1985 * b * A4 * 96 * zh * P * ¥10.00 * 1000 * 12 * 2023-02

JOURNAL OF SHAANXI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Feb. 2023

(Natural Science Edition)

Vol. 39 No. 1

CONTENTS

Optimization of Inconel 718 high temperature alloy single layer multi-pass laser cladding forming process	WANG Cong CHEN Jian-gang PENG Yan-long et al (1)
Research on topology optimization of screw compressor rotor under fluid-thermo-solid coupling	WANG Kai HE Ya-yin ZHANG Wei et al (10)
Effect of load on blade deformation of axial flow compressor at different speeds	LIU Zhi-yuan WANG Jun-li ZHANG Bao-sheng (18)
Review on the research status of polypropylene material modification applied to HVDC cable insulation	CHEN Shao-jie HUI Zhuo-bin LI Huan (27)
Active earth pressure analysis of unsaturated finite soil under rainfall	WANG Ning LI Ya-yun ZHANG Bo et al (37)
Ship target detection based on improved YOLOv5	ZHONG You-wen CHE Wen-gang (42)
Audio watermarking algorithm based on SWT and DCT	QI Yan-bo DU Qing-zhi LONG Hua et al (51)
Microservice decomposition method based on class coupling relation ...	LIU Ruo-yu LIU Xiao-yan (60)
Research for algorithm on the scheduling problem of three parallel machines with two GoS levels	WU Zhao-rui CHEN Zhi-bin WANG Yang (67)
Exponential decay of energy for the solutions to the damped Schrödinger and plate equations	BAI Zhong-yu CHEN Na-na (73)
Spectral projection gradient method for minimum 1-norm solution to absolute value equation	WANG Ai-xiang (80)
Analysis of quantitative model construction and development strategy of SWOT-AHP for sports tourism —Taking Chengdu Xiling Snow Mountain scenic area as an example	ZHANG Zhen-jing HU Qiao LIAO Mei-jie (86)

引用格式: 王聪,陈建刚,彭彦龙,等. Inconel 718 高温合金单层多道激光熔覆成形工艺优化[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版),2023,39(1):1-9.

Inconel 718 高温合金单层多道激光熔覆成形工艺优化

王 聪¹, 陈建刚^{1,2*}, 彭彦龙¹, 李建刚¹, 柳 召¹

1. 陕西理工大学 机械工程学院, 陕西 汉中 723000;
2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049

摘 要: 为提高镍基高温合金激光熔覆成形质量,采用正交试验法,分析 Inconel 718 高温合金在不同工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉速率和搭接率)下,单层多道激光熔覆表面平整度和熔覆宽度的变化规律。结合综合评分法,得到成形质量最佳工艺条件为激光功率 2100 W,扫描速度 19 mm/s,送粉速率 2 r/min,搭接率 30%;其中,搭接率对熔覆层表面平整度和熔覆宽度的影响最大,送粉速率对表面平整度影响最小,激光功率对熔覆层宽度影响最小。

关键词: Inconel 718 高温合金;激光熔覆;单层多道;正交试验法;成形质量

中图分类号: TG176;TG665 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-3998(2023)01-0001-09

激光熔覆表面处理技术是在高能激光束的作用下,将合金粉材快速熔化并冷却,形成一种具有高硬度、高强度、耐磨损的冶金结合涂层^[1-2]。在航空航天、航海、煤矿、车辆、医疗等行业具有广阔的应用前景^[3]。在实际应用过程中,存在表面不平整、熔覆层塌陷、孔隙^[4-5]等缺陷,究其原因,是受成形设备、成形材料、成形工艺、成形方法、实际工况等因素的影响,其中工艺参数不匹配直接制约成形质量,如激光功率、扫描速度、送粉速率和离焦量等。因此,合理选取激光熔覆工艺参数是保证熔覆层致密、无裂痕及性能良好的关键要素^[6]。

2019 年,Bourahima 等^[7]研究了铜镍铝基体上熔覆镍基粉末的工艺参数对涂层结合性能和几何形状的影响,发现随着扫描速度的增大,熔覆层高度和宽度减小,当送粉速率减小时,熔覆层与基体之间的结合性能得到改善。2019 年,南通大学赵建峰等^[8]分析了轧辊激光熔覆各工艺参数对熔覆层稀释率、硬度和耐磨性的影响程度,通过参数优化,熔覆层稀释率和磨损度都有了一定程度的降低,硬度有所提高。2021 年,石淑婷等^[9]研究了 Q235 钢基体上熔覆 Fe-Cr-Ni 粉末的工艺参数对熔覆层表面形貌、稀释率及显微硬度的影响,通过综合计分法进行参数优化的同时,还分析了优化工艺下熔覆层的组织形态、显微硬度和摩擦磨损性能。与优化前相比,熔覆层硬度有所提高,磨损度显著降低。

当前的研究焦点在于工艺参数对单道激光熔覆涂层硬度、耐磨性能的影响,而对于单层多道熔覆层尺寸及表面平整度的研究相对较少。本文针对煤矿领域液压支架材料 Q690 高强钢,采用高温综合力学性能优异,且具有良好的热加工及耐腐蚀性能的 Inconel 718 合金^[11],研究在 Q690 高强钢表面制备

收稿日期:2022-06-30 修回日期:2022-09-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51505268);陕西省教育厅重点科学研究计划项目(20JS020)

* 通信作者:陈建刚(1978—),男,陕西扶风人,博士,副教授,主要研究方向为 3D 打印技术、微纳制造装备与工艺、数字化制造技术。

Inconel 718 合金涂层的最优工艺参数。

1 试验准备与过程

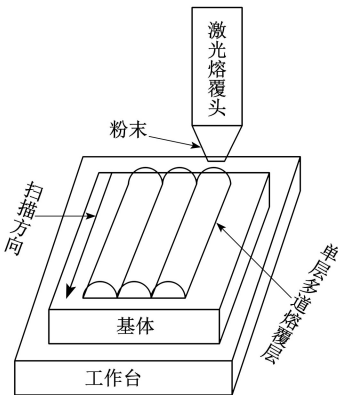
采用 Q690 高强度钢作为激光熔覆的基体,Inconel 718 合金作为熔覆粉材,进行单层多道激光熔覆搭接试验,优化参数为激光功率、扫描速度、送粉速率、搭接率,评价指标为熔覆层表面平整度和熔覆层宽度,建立四因素四水平正交试验,分析不同工艺参数对熔覆表面平整度和熔覆层宽度的影响规律,结合综合评分法得到 Q690 高强度钢表面单层多道搭接激光熔覆的最优工艺参数。

1.1 试验设备

图 1 为 3000 W 柔性光纤激光再制造成形系统及单层多道工艺示意图。激光熔覆系统由光纤激光器、控制系统、ABB 机械臂、送粉系统、水冷系统、保护气和工作台等组成,设备参数见表 1。工艺参数为激光功率 1500 ~ 2400 W,激光波长 900 ~ 1200 nm,扫描速度 15 ~ 21 mm/s,离焦量 -1 ~ 1 mm,送粉速率(双桶送粉器的转速)1.8 ~ 2.4 r/min,保护气的气压 5 ~ 10 MPa,送粉气的气压 10 ~ 14 MPa。



(a) 3000 W 柔性光纤激光再制造成形系统



(b) 单层多道工艺示意图

1. 水冷系统;2. 光纤激光器;3. 控制系统;4. 保护气和送粉气;5. 送粉系统;6. 机械臂;7. 激光熔覆头;8. 工作台

图 1 3000 W 激光熔覆系统及单层多道工艺示意图

表 1 3000 W 激光熔覆机设备参数

序号	名称	型号	参数	功能及其作用	提供厂商
1	水冷系统	CWFL-3000	温控精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	控制温度	广州特域机电有限公司
2	光纤激光器	RFL-A3000D	工作电源(VAC): 三相电压 380 V (波动范围 $\pm 10\%$), 频率 50/60 Hz,交流电	提供激光光束	湖北武汉锐科光纤激光技术股份有限公司
3	保护气和送粉气	氩气	摩尔质量 40 g/mol	有利于熔覆效果	陕西汉中环洋气体有限公司
4	送粉系统	RH-DFOM-01 双型送粉器	送粉量精度 $< 1\%$	输送 Inconel 718 合金粉材	江苏南京辉锐光电科技有限公司
5	机械臂	BRTIRUS1510A	臂长 1500 mm	根据试件大小调整位置	广东伯朗特智能装备有限公司
6	激光熔覆头	3000 W 激光熔覆头	喷嘴出粉口 外径 12 mm	喷出 Inconel 718 合金粉材和激光	西安天元增材制造高端装备有限公司

1.2 预处理工艺及粉材

基材的几何外形尺寸 110 mm × 90 mm × 3 mm,预处理工艺:去除表面氧化皮,用酒精擦拭待熔覆区表面,干燥备用。激光熔覆粉材采用 Inconel 718 高温镍基合金,预处理工艺:烘干处理,确保干燥性。

粉材颗粒尺寸也是影响成形质量的因素之一,在保证合金粉材化学成分的前提下,需分析粉材的颗粒尺寸分布规律,提高送粉的流畅性及涂层质地的均匀性。

合金粉末形貌及粒径分布如图 2 所示。采用基恩士超景深三维显微系统 VHX-7000 观测合金粉末形貌(图 2(a)),测量标尺为 100 μm,粒径主要分布在 35 ~ 50 μm(图 2(b))。依据试验要求及激光熔覆设备实际喷嘴几何尺寸要求,该粉材满足本次试验要求,基材及粉末化学成分见表 2 和表 3。

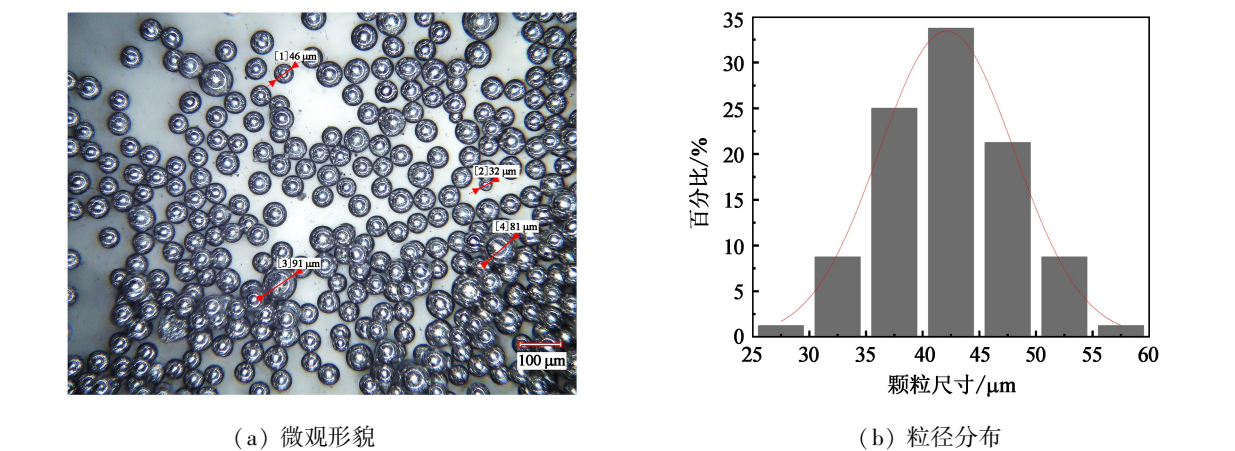


图 2 Inconel 718 合金粉末微观形貌及粒径分布图

表 2 Q690 高强度钢化学成分

元素	C	Si	Mo	P	Cr	Nb	Ni	Cu	Mn	B
质量分数/%	≤0.18	≤0.6	≤0.3	≤0.03	≤1.0	≤0.11	≤0.8	≤0.8	≤2.0	≤0.004

表 3 Inconel 718 合金粉末化学成分

元素	Ni	Cr	Nb	Ti	Mo	Al	C	Si	Mn	Fe
质量分数/%	51.1	18.95	4.99	0.97	2.99	0.61	0.034	0.04	0.015	Bal

1.3 正交试验与理论处理

本次试验采用田口法正交试验设计,建立四因素四水平正交试验表(表 4)。因此,需要在 Q690 高强度钢表面做 16 组多道搭接熔覆试验,保护气的气压设置为 8 MPa,送粉气的气压设置为 12 MPa,离焦量设置为 -1 mm,搭接次数为 6 次。

表 4 正交试验因素水平表

水平	A 激光功率/W	B 扫描速度/(mm · s ⁻¹)	C 送粉速率/(r · min ⁻¹)	D 搭接率/%
水平 1	1500	15	1.8	30
水平 2	1800	17	2.0	40
水平 3	2100	19	2.2	50
水平 4	2400	21	2.4	60

熔覆层宽度和表面平整度作为熔覆层尺寸和性能参数,表征了基体与熔覆层之间冶金结合程度。本文所选响应指标为 Inconel 718 多道搭接激光熔覆的熔覆层宽度和熔覆层的表面平整度。图 3 为多道搭接激光熔覆示意图,搭接率 μ 表示多道熔覆试验中相邻两道熔覆道间的搭接

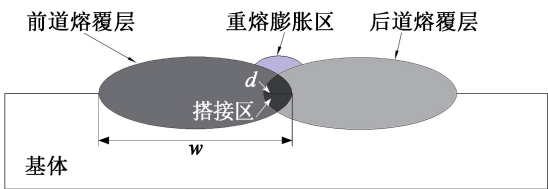


图 3 多道搭接激光熔覆示意图

宽度 d 与实际单道熔覆层宽度 w 的比值,即

$$\mu = \frac{d}{w} \times 100\%。$$

(1)

图 4 为多道搭接熔覆层截面示意图,图中 A_m 为熔池面积(μm^2), A_c 为熔覆层截面面积(μm^2), H 为熔覆层截面高度(μm), W 为多道熔覆层宽度(μm)。表面平整度 F 的定义为^[12]

$$F = \frac{A_c}{W \times H} \times 100\%，$$

(2)

当熔覆层峰谷起伏之间的高度差越小, F 值就越接近于 1, 即熔覆层的表面平整度越好^[3]。

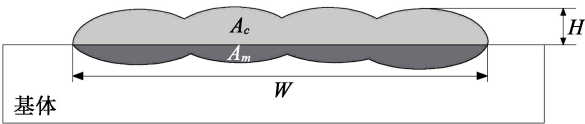


图 4 熔覆层截面示意图

1.4 试验结果与数据统计

采用线切割工艺进行取样, 并进行磨抛、腐蚀试样。通过基恩士超景深显微镜测量熔覆层面积、熔覆层高度及熔覆层宽度, 熔覆层截面尺寸测量示意图见图 5。

通过式(2)计算熔覆层表面平整度并记录表面平整度和熔覆层宽度, 其结果见表 5, 其中因素 A、B、C、D 分别对应本次激光单层多道熔覆工艺参数中激光功率、扫描速度、送粉速率、搭接率。

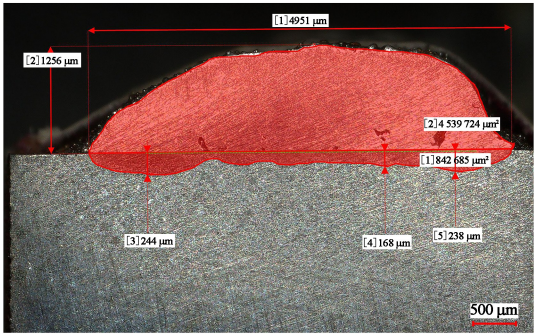


图 5 熔覆层截面尺寸测量

表 5 正交试验方案及数据统计结果

序号	因素 A/W	因素 B/(mm · s ⁻¹)	因素 C/(r · min ⁻¹)	因素 D/%	表面平整度/%	熔宽/mm
1	1500	15	1.8	30	87.20	8.40
2	1500	17	2.0	40	79.48	8.59
3	1500	19	2.2	50	86.36	9.35
4	1500	21	2.4	60	73.00	4.95
5	1800	15	2.0	50	76.23	9.24
6	1800	17	1.8	60	73.98	5.12
7	1800	19	2.4	30	90.19	8.73
8	1800	21	2.2	40	85.16	7.83
9	2100	15	2.2	60	74.53	7.22
10	2100	17	2.4	50	77.92	8.80
11	2100	19	1.8	40	79.10	9.04
12	2100	21	2.0	30	88.39	8.78
13	2400	15	2.4	40	75.15	9.26
14	2400	17	2.2	30	78.57	9.31
15	2400	19	2.0	60	69.09	8.74
16	2400	21	1.8	50	75.95	8.07

2 数据处理与分析

2.1 熔覆层表面平整度

采用极差分析不同水平与因素对熔覆层表面平整度影响的显著性, 结果见表 6, 表中 R 是每个因素对应的极差值。一般各列极差不相等说明各因素的水平改变对试验结果的影响不相同, 极差最大的那

一列所对应的就是对试验结果影响最大的因素。表 6 中 4 个因素的极差值为 6.82、3.70、2.86、13.44。第四列的极差值最大,说明搭接率对熔覆层表面平整度的影响最大;其次是激光功率,相对搭接率较小;扫描速度和送粉速率对熔覆层表面平整度的影响都相对较小,其中影响最小的是送粉速率。优化方案中各因素最优水平的确定与试验指标有关,若指标越大越好,则应选取使指标大的水平;反之,则应选取使指标小的水平。对于熔覆层表面平整度,指标值越大越好。

表 6 正交试验对熔覆层表面平整度的分析结果

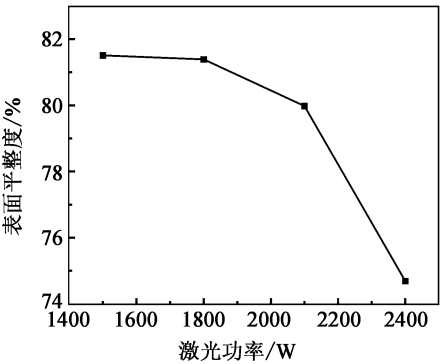
组别	A 激光功率/W	B 扫描速度/(mm·s ⁻¹)	C 送粉速率/(r·min ⁻¹)	D 搭接率/%
k ₁	81.51	78.28	79.06	86.09
k ₂	81.39	77.49	78.30	79.71
k ₃	79.98	81.19	81.16	79.11
k ₄	74.69	80.63	79.06	72.65
R	6.82	3.70	2.86	13.44
最优水平组		A ₁ B ₃ C ₃ D ₁		

先把 4 个因素对熔覆层表面平整度的影响分别按比例换算为影响系数(即将每个因素对应的极差值除以 4 个因素的极差值之和),定义熔覆层表面平整度公式为^[13]

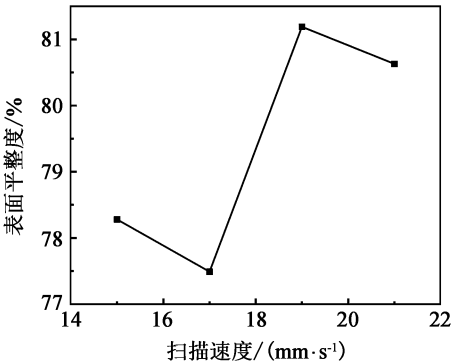
$$u = A\lambda_1 + B\mu_1 + C\nu_1 + D\alpha_1,$$
(3)

式中 A 代表激光功率(W), B 代表扫描速度(mm/s), C 代表送粉速率(r/min), D 代表搭接率(%),激光功率影响系数 $\lambda_1 = 25.42\%$,扫描速度影响系数为 $\mu_1 = 13.80\%$,送粉速率影响系数 $\nu_1 = 10.66\%$,搭接率的影响系数为 $\alpha_1 = 50.12\%$ 。

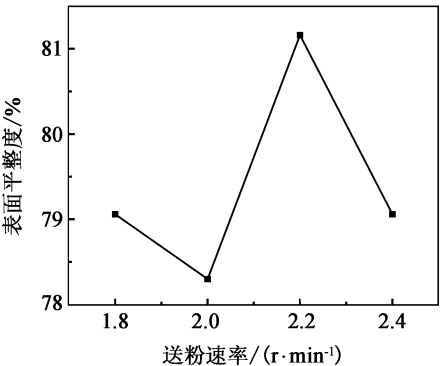
依据因素 A、B、C、D 的平均值,分别作出 4 个因素对熔覆层表面平整度的影响趋势图(图 6),找到 4 个因素 A、B、C、D 对应的最优水平。



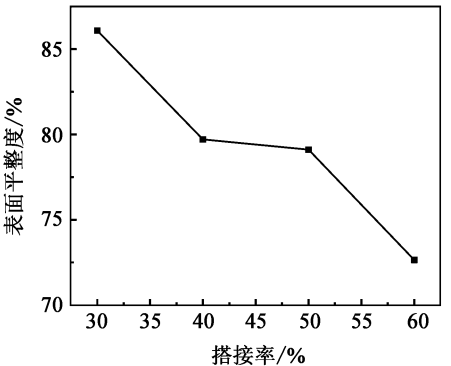
(a) A 激光功率对表面平整度的影响



(b) B 扫描速度对表面平整度的影响



(c) C 送粉速率对表面平整度的影响



(d) D 搭接率对表面平整度的影响

图 6 工艺参数对熔覆层表面平整度的影响趋势

由图 6 可以看出,随着激光功率的增加,平整度呈逐渐减小的趋势,在激光功率为 2400 W 时取得最小值。扫描速度对平整度的影响呈先减后增的趋势,在扫描速度为 17 mm/s 时取得最小值。当扫描速度较小时,送粉速率对平整度的影响与扫描速度呈相似的趋势,在送粉速率为 2.0 r/min 时,熔覆层平整度达到最小值。搭接率对熔覆层平整度的影响表现为阶梯式减小,在搭接率 60% 时,达到最小值,原因是当搭接率逐渐增加时,前一道熔覆层与后一道熔覆层之间搭接区域表面重叠,从而使得熔覆层表面平整度减小。因此,得到 4 个因素对熔覆层表面平整度的最优组别为 $A_1B_3C_3D_1$ 。

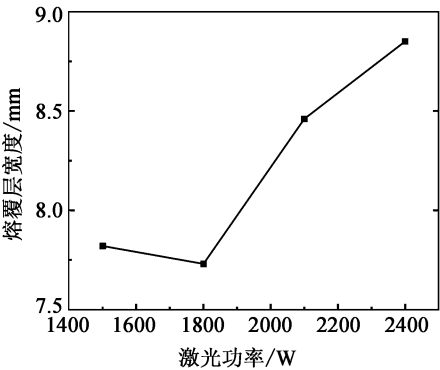
2.2 熔覆层宽度

采用极差法对单层多道熔覆层宽度进行分析,结果见表 7,表中 R 是每个因素的极差值,4 个因素的极差值为 1.12、1.56、1.18、2.36。第四列的极差值最大,说明搭接率对熔覆层宽度的影响最大,紧随其后的是扫描速度,对熔覆层宽度影响相对较小的是激光功率和送粉速率。极差法对熔覆宽度的选择标准是越大越好。

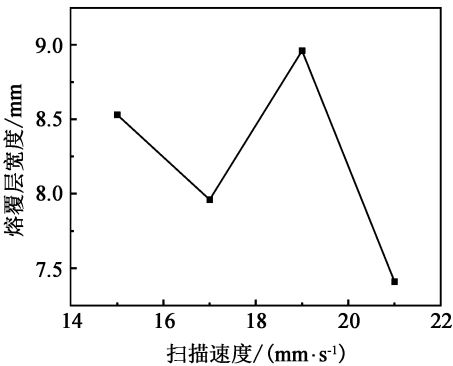
表 7 正交试验对熔覆层宽度的分析结果

组别	A 激光功率/W	B 扫描速度/(mm·s ⁻¹)	C 送粉速率/(r·min ⁻¹)	搭接率 D/%
k ₁	7.82	8.53	7.66	8.81
k ₂	7.73	7.96	8.84	8.68
k ₃	8.46	8.96	8.43	8.87
k ₄	8.85	7.41	7.94	6.51
R	1.12	1.56	1.18	2.36
最优水平组	$A_4B_3C_2D_3$			

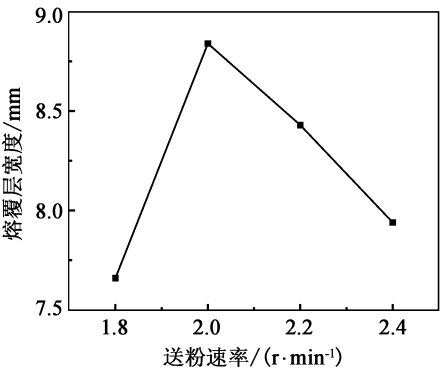
依据这 4 个因素的平均值,分别作出 4 个因素对多道搭接熔覆层宽度的影响趋势图(图 7),找到因素 A、B、C、D 对应的最佳水平。



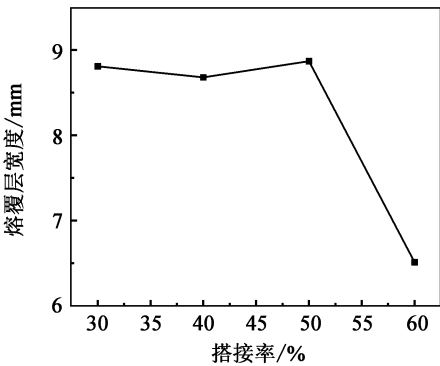
(a) A 激光功率对熔覆层宽度的影响



(b) B 扫描速度对熔覆层宽度的影响



(c) C 送粉速率对熔覆层宽度的影响



(d) D 搭接率对熔覆层宽度的影响

图 7 工艺参数对熔覆层宽度的影响趋势

先按比例把 4 个因素对熔覆层宽度的影响换算为影响系数(即将每个因素对应的极差值除以 4 个因素的极差值之和),定义熔覆层宽度公式为^[13]

$$\varphi = A\lambda_2 + B\mu_2 + C\nu_2 + D\alpha_2, \tag{4}$$

式中 A 代表激光功率(W), B 代表扫描速度(mm/s), C 代表送粉速率(r/min), D 代表搭接率(%), λ_2 为激光功率影响系数, μ_2 为扫描速度影响系数, ν_2 为送粉速率影响系数, α_2 为搭接率影响系数。 λ_2 、 μ_2 、 ν_2 、 α_2 的值分别为 18.01%、25.08%、18.97%、37.94%。

从图 7 中可以看出:

- (1)随着激光功率的增加,熔覆层宽度先减小后增大,在激光功率为 2400 W 时,熔覆层宽度取得最大值。原因是当激光功率较小时,单位面积提供的能量减小,熔池对流作用减弱,持续时间缩短,粉末不能充分熔化,因此熔覆层宽度较小,随着激光功率逐渐增加,在激光面积一定的条件下,单位面积的能量密度随之提高,熔覆粉末和基体获得充足的能量,熔池中熔化的粉末量增加使得残留在表面的粉末大幅度减少,导致功率较大时,熔覆层宽度逐渐增加。
- (2)当扫描速度逐渐增加时,熔覆层宽度先波动下降,在扫描速度为 19 mm/s 时,达到一个波峰,扫描速度继续增加时,熔覆层宽度随之减小。原因是当扫描速度较小时,熔覆区域单位面积内获得的能量和粉末增加,熔覆面积增大,同时熔池持续时间较长,熔覆层宽度增加。
- (3)随着送粉速率的增加,熔覆层宽度的变化趋势呈先增加后减小的趋势,在送粉速率为 2.0 r/min 时,达到最大值。分析原因可知,随着送粉速率不断增大,单位面积内的粉末量在一定程度上得到了增加,使得熔池中熔化的粉末量也在增加,导致熔覆层宽度增加。当送粉速率继续增加时,由于粉末较多,激光无法将它们完全熔化,因此熔覆层宽度减小。
- (4)当搭接率逐渐增加时,熔覆层宽度刚开始变化不大,在搭接率为 50% 时,达到最大值,搭接率继续增加时,熔覆层宽度快速减小。

综上,得到 4 个因素对熔覆层宽度的最优组别为 $A_4B_3C_2D_3$ 。

2.3 综合评分优化

根据正交试验对熔覆层表面平整度和熔覆层宽度的分析结果可知,各工艺参数对表面平整度的影响主次顺序为“搭接率 > 激光功率 > 扫描速度 > 送粉速率”,对应的最优工艺参数组合为 $A_1B_3C_3D_1$;各工艺参数对熔覆层宽度的影响主次顺序为“搭接率 > 扫描速度 > 送粉速率 > 激光功率”,对应的最优工艺参数组合为 $A_4B_3C_2D_3$ 。

综合评分法是将多个指标综合为单指标,在对多个指标逐个测定之后,按照由具体情况确定的原则,对多个指标综合评分,将多个目标转化为单指标,于是就可以用单指标分析的方法获得多指标试验的结论。具体分析如下:

在综合评分前,考虑到表面平整度和熔覆层宽度的量纲不同,不能直接用来分析,因此先通过隶属度计算来统一量纲,隶属度和综合分计算公式为

$$F_V = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \tag{5}$$

$$W_V = \frac{Y - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}, \tag{6}$$

$$Z = \omega_1 \times F_V + \omega_2 \times W_V, \tag{7}$$

式中 F_V 为表面平整度的指标隶属度, W_V 为熔覆层宽度的隶属度, Z 为综合分,下角标 V 表示指标隶属度, X 是表面平整度试验值, Y 是熔覆层宽度的试验值,下角标 $\max$ 、 $\min$ 表示最大值和最小值, ω_1 表征表面平整度在质量评价中的重要程度, ω_2 表征熔覆层宽度在质量评价中的重要程度。

表面平整度是衡量多道熔覆试验后,试件的有效利用程度。表面平整度越高,熔覆表面越平整;相反的,表面平整度越低,熔覆表面凹凸越明显,后期减材处理工艺需去除的材料越多,相比熔覆层宽度来说较为重要。因此, ω_1 取值为 0.6, ω_2 取值为 0.4,综合评分法结果见表 8。

表 8 综合评分法分析结果

序号	因素				隶属度		综合评分
	A/W	B/(mm·s ⁻¹)	C/(r·min ⁻¹)	D/%	熔宽	表面平整度	
1	1500	15	1.8	30	0.78	0.86	0.828
2	1500	17	2.0	40	0.83	0.49	0.626
3	1500	19	2.2	50	1.00	0.82	0.694
4	1500	21	2.4	60	0.00	0.19	0.114
5	1800	15	2.0	50	0.98	0.34	0.596
6	1800	17	1.8	60	0.04	0.23	0.154
7	1800	19	2.4	30	0.86	1.00	0.944
8	1800	21	2.2	40	0.65	0.76	0.716
9	2100	15	2.2	60	0.52	0.26	0.364
10	2100	17	2.4	50	0.88	0.42	0.604
11	2100	19	1.8	40	0.93	0.47	0.654
12	2100	21	2.0	30	0.87	0.91	0.894
13	2400	15	2.4	40	0.98	0.29	0.548
14	2400	17	2.2	30	0.99	0.45	0.666
15	2400	19	2.0	60	0.86	0.00	0.344
16	2400	21	1.8	50	0.71	0.33	0.482
k ₁	0.566	0.584	0.530	0.833			
k ₂	0.603	0.513	0.615	0.636			
k ₃	0.629	0.659	0.610	0.594			
k ₄	0.510	0.552	0.553	0.224			
R	0.119	0.147	0.086	0.589			

经过综合评分法分析得到最佳工艺参数组合为 A₃B₃C₂D₁,即激光功率为 2100 W,扫描速度为 19 mm/s,送粉速率为 2 r/min,搭接率为 30%。优化前和优化后试验验证的熔覆层截面形貌如图 8 所示,从图中可以看出该工艺参数下制备的熔覆涂层与优化前相比表面平整,熔覆层宽度较大。通过对图中优化后的熔覆层截面进行测量和前文提到的表面平整度计算公式,可以得出优化后的熔覆层表面平整度为 80.50%,熔覆层宽度为 9.04 mm,熔覆层与基体之间结合紧密,并且结合区域内无裂纹、杂质、气孔等内部缺陷,冶金结合良好,综合质量最优。这充分验证了利用综合评分优化所得最优参数组的准确性和科学性。

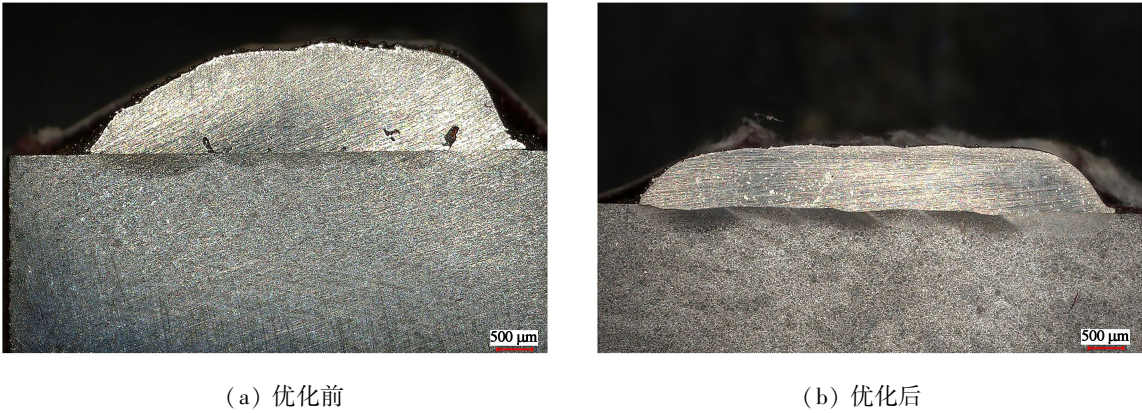


图 8 多道搭接熔覆层截面形貌

3 结论

(1)搭接率对表面平整度的影响最大,送粉速率影响最小。扫描速度和激光功率对熔覆层表面平整度的影响并不显著,表面平整度的值与搭接率成反比。增大扫描速度,减小激光功率可以获得较平整的熔覆层表面。

(2)搭接率对熔覆层宽度的影响最大,激光功率影响最小。送粉速率和扫描速度对熔覆层宽度的影响并不显著。增大扫描速度和送粉速率,可以获得较宽的熔覆层。

(3)经过综合评分法优化得到的最佳多道搭接熔覆工艺参数组合为激光功率 2100 W,扫描速度 19 mm/s,送粉速率 2 r/min,搭接率 30%。

[参 考 文 献]

[1] 王贤才,张亚普,柴蓉霞. 27SiMn 钢表面激光熔覆 304 不锈钢的组织 and 性能[J]. 金属热处理,2020,45(4):188-193.

[2] 蒋三生,梁立帅,舒致远. 45 钢表面激光熔覆 Co 基合金覆层工艺优化[J]. 材料导报,2020,34(增刊1):448-451.

[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.

[4] 张胜江,王明娣,倪超,等. QT800-2 球墨铸铁表面激光熔覆工艺参数多目标优化[J]. 表面技术,2021,50(7):74-82.

[5] 杜彦斌,周志杰,许磊,等. 基于灰色关联分析与自适应混沌差分进化算法的激光熔覆工艺参数优化方法[J]. 计算机集成制造系统,2022,28(1):149-160.

[6] 曹强,练国富,肖石洪,等. 基于灰色关联分析激光熔覆 Ni60A 工艺参数优化[J]. 精密成形工程,2022,14(1):173-181.

[7] BOURAHIMA F, HELBERT A L, REGE M, et al. Laser Cladding of Ni Based Powder on a Cu-Ni-Al Glassmold: Influence of the Process Parameters on Bonding Quality and Coating Geometry[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 1018-1028.

[8] 赵建峰,张小萍. 轧辊激光熔覆再制造工艺参数优化[J]. 锻压技术,2019,44(8):80-85.

[9] 石淑婷,陈建刚,舒林森,等. Fe-Cr-Ni 粉末激光熔覆工艺优化及性能研究[J]. 应用激光,2021,41(5):955-960.

[10] 韩丽民. Q690 钢板在液压支架结构件的应用[J]. 同煤科技,2020(6):18-21.

[11] 方金祥,王玉江,董世运,等. 激光熔覆 Inconel 718 合金涂层与基体界面的组织及力学性能[J]. 中国机械工程,2019,30(17):2108-2113.

[12] WEN Peng, PENG Zhen-hua, ZHENG Shi-qing. Formation quality optimization of laser hot wire cladding for repairing martensite precipitation hardening stainless steel[J]. Optics laser technology, 2015, 65: 180-188.

[13] 张坚,王震,赵龙志,等. 基于正交试验法的激光熔覆 4J36 低膨胀合金涂层工艺优化[J]. 兵器材料科学与工程,2016,39(5):11-15.

[责任编辑:魏 强]

Optimization of Inconel 718 high temperature alloy single layer
multi-pass laser cladding forming process

WANG Cong¹, CHEN Jian-gang^{1,2}, PENG Yan-long¹, LI Jian-gang¹, LIU Zhao¹
1. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;
2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: In order to improve the quality of nickel based high temperature alloy laser clad forming, orthogonal test method was used to analyze the variation of surface flatness and clad width of single-layer multi-pass laser cladding of Inconel 718 high temperature alloy under different process parameters (laser power, scanning speed, powder feeding rate and lap rate). The optimum process conditions for the forming quality were obtained by combining the integrated scoring method, including laser power of 2100 W, scanning speed of 19 mm/s, powder feeding rate of 2 r/min, and lap rate of 30%; among which, the lap rate had the greatest influence on the surface flatness and weld width of the welded layer, the powder feeding rate had the least influence on the surface flatness, and the laser power had the least influence on the weld width.

Key words: Inconel 718 high temperature alloy; laser cladding; single layer multi-pass; orthogonal test method; forming quality