

基于响应面分析法的机械锤击辅助激光熔覆工艺参数优化分析

张 辉^a,王军航^b,刘刚田^a,王军华^{b,c,d},李东林^b

(河南科技大学 a.艺术与科技学院; b.机电工程学院; c.河南省智能制造装备工程技术研究中心; d.智能数控装备河南省工程实验室,河南 洛阳 471023)

摘要:为了有效提升激光熔覆修复再制造熔覆层与基体间的界面结合强度,采用在激光熔覆过程中同步辅助机械锤击的工艺方法,以机械锤击力、锤击次数和锤击频率为因素,以熔覆成形结构的抗拉强度、延伸率和显微硬度为优化目标,设计3因素、3水平实验,采用响应面分析法,优化了机械锤击工艺参数组合,以期获得理想的熔覆层与基体间界面结合强度。结果表明:当机械锤击力为2 000 N,锤击次数为3次,锤击频率为2 Hz时,抗拉强度为1 209 MPa,延伸率为11.8%,显微硬度为486HV,综合力学性能最优。

关键词:激光熔覆;机械锤击;响应面分析法;工艺参数优化

中图分类号:TG174.4

文献标志码:A

0 引言

作为一种高效经济的金属零件表面改性技术,激光熔覆以激光束为移动热源,以金属粉末为熔覆材料,基于离散堆积的制造方式实现零件表面改性,增加表面强度,提升耐磨性^[1-4]。熔覆层与基体间结合强度是决定金属零件能否满足再次服役要求的关键指标^[5-8],深入研究提升激光熔覆层界面结合强度的方法具有十分重要的意义。

近年来,国内外学者针对激光熔覆修复再制造界面结合强度问题开展了大量研究,取得了一些有益的成果。文献[9]采用激光定向沉积技术在S325低碳钢基体上制备了316L不锈钢钢块组件,研究了组件内部孔隙及裂纹缺陷,并测量了熔合界面处的元素组成与显微硬度,确定了组件凝固模式及行为。文献[10]首次采用选区熔化增材制造技术在钛合金基体上制备1层0.2 mm厚V层,并采用激光熔覆工艺增材制造17-4PH不锈钢,使其与钛合金基体强链接,有效提升了结合强度。文献[11]利用激光沉积成形技术制备功能梯度结构体,研究了不同材料沉积后界面结合处两侧的组织特征,结果发现界面结合处存在未熔颗粒,易导致熔合不良及裂纹、气孔等缺陷,影响功能梯度结构体力学性能。文献[12]研究了激光工艺参数对304L不锈钢激光定向沉积结构微观组织及力学性能的影响,结果发现低线性热输入条件下试样的屈服强度、抗拉强度和延展性较高。文献[13-14]通过对超声辅助制备24CrNiMoY合金钢熔覆层研究发现,超声振动可有效提高熔覆层的拉伸性能,与基体相比,最优工艺参数条件下所制备试样的抗拉强度和伸长率得到显著提升。文献[15]采用超声辅助制备的Fe901铁基合金熔覆层,研究发现相较于未经超声振动辅助处理的熔覆层,超声辅助制备铁基熔覆层的抗塑性变形能力提升了40%。超声振动等外场辅助技术在激光熔覆中获得大量应用,有效提升了铁基合金^[16]、镍基高温合金^[17]和钴基合金^[18]激光熔覆层的硬度、耐磨损以及抗腐蚀等性能。然而,超声振动等方式对激光熔覆成形结构的影响较为有限,机械锤击等锻压方式具有结构简单、易于控制等特点,在激光熔覆外场辅助方面极具潜力,探索锤击工艺参数的影响是实现优化控制基础。在工艺优化方面,较多的研究是通过采用机器学习的方式对工艺参数进行优化^[19-21]。由于机器学习优化方法依赖于大量实验数据进行训练,

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF1101600);国家自然科学基金项目(52105054);2025年度河南省科技攻关项目(252102111176);高端装备界面科学与技术全国重点实验室开放基金项目(SKLTkf22B12)

作者简介:张辉(1983—),男,河南洛阳人,讲师,硕士,主要研究方向为智能装备辅助设计。

收稿日期:2025-02-13

具有较高的时间和材料成本,在很大程度上限制了其应用。

为了探索研究机械锤击外场辅助激光熔覆过程中机械锤击工艺参数对熔覆层与基体间界面结合强度的影响,优化锤击工艺参数,本文采用响应面分析法,分析机械锤击工艺参数对激光熔覆成形结构力学性能的影响,通过优化分析,以期得到最优的机械锤击参数,为有效提高激光熔覆成形熔覆层与基体间的界面结合强度提供实验数据支撑。

1 实验设计

1.1 实验设备与材料

所用激光熔覆装置主要包括 400W SPI 连续激光器、DPSF-D2 型送粉器、三轴联动数控运动平台、四通道同步送粉激光熔覆头、手套箱、送粉气/保护气系统、数控系统等。

以马氏体沉淀硬化不锈钢(17-4PH)为熔覆材料,以 316L 不锈钢板材作为基体,进行激光熔覆实验,分析不同机械锤击工艺参数条件下熔覆界面处性能特征。其中,熔覆材料为马氏体沉淀硬化不锈钢(17-4PH)粉材,粉末粒度为 85~120 μm。基体板材和熔覆材料的化学成分分别如表 1 和表 2 所示。为防止粉末颗粒表面吸附水分造成粉末粘粉,影响熔覆质量,实验开始前将粉末颗粒放置于真空干燥箱内,在 150 ℃ 条件下连续高温烘干 2~4 h,以消除水分,提高流动性。同时,为防止 316L 不锈钢板材表面氧化层的不良影响,先后对其进行砂纸打磨和丙酮清洗,然后晾干备用。

表 1 316L 不锈钢板材的化学成分 %

$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Mo})$
<0.03	<2.0	<1.0	<0.045	<0.03	16.0~18.0	10.0~14.0	2.0~3.0

表 2 马氏体沉淀硬化不锈钢(17-4PH)粉材的化学成分 %

$w(\text{C})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Nb})$
<0.07	<1.0	<1.0	<0.04	<0.03	15.0~17.5	3.0~5.0	3.0~4.5	0.15~0.45

机械锤击辅助激光熔覆过程中,采用高纯氩气作为送粉气和保护气,将 17-4PH 粉材从送粉器内带出,经四通道同轴激光熔覆头进入熔池,按规划路径进行扫描,随着熔覆材料的逐道逐层熔化凝固,实现修复成形。每熔覆 1 层后,停止送粉并移开激光熔覆头,将机械锤击装置移动至熔覆层上方指定位置,按照实验设定的机械锤击力和锤击频率实施机械锤击,完成锤击次数后,移开机械锤击装置,再将激光熔覆头移动至熔覆层上方指定位置,开始下一层沉积,如此反复,直至完成预设熔覆成形实验。

1.2 实验设计

为了对机械锤击工艺进行优化,获得最优机械锤击参数组合,采用响应面分析法对机械锤击参数进行优化分析。以机械锤击力、锤击次数和锤击频率为因素,以熔覆成形结构的抗拉强度、延伸率和显微硬度为优化目标,采用 Design-Expert 软件进行响应曲面实验设计,设计 3 因素、3 水平机械锤击辅助的激光熔覆实验。在机械锤击参数优化过程中,分别设定各因素取值范围为:机械锤击力 1 000~3 000 N,单层锤击次数 1~3 次,锤击频率 0.5~2 Hz。各设计因素不同水平进行编码如表 3 所示。锤击参数优化响应面实验设计和检测结果如表 4 所示。

表 3 设计因素与水平

水平	因素		
	A 机械锤击力/N	B 锤击次数	C 锤击频率/Hz
-1	1 000	1	0.5
0	2 000	2	1
1	3 000	3	2

表 4 响应面实验设计和检测结果

序号	A 机械锤击力/N	B 锤击次数	C 锤击频率/Hz	抗拉强度/MPa	延伸率/%	显微硬度/HV
1	2 000	2	1	1 206	12.2	468
2	1 000	1	1	1 098	13.6	382
3	1 000	2	0.5	1 135	12.6	405
4	1 000	2	2	1 124	12.8	392
5	1 000	3	1	1 235	11.8	498
6	2 000	2	1	1 210	12.0	475
7	2 000	1	0.5	1 156	12.2	435
8	2 000	1	2	1 135	12.5	427
9	2 000	3	0.5	1 258	11.3	495
10	2 000	3	2	1 209	11.8	486
11	2 000	2	1	1 186	11.5	462
12	3 000	1	1	1 204	12.2	489
13	3 000	2	0.5	1 265	11.2	508
14	3 000	2	2	1 246	11.4	505
15	3 000	3	1	1 325	10.7	521
16	2 000	2	1	1 197	11.8	465
17	2 000	2	1	1 208	12.1	472

1.3 检测设备及方法

机械锤击辅助激光熔覆成形实验完成后,利用线切割机床将成形结构切片,分别制备非标准片状拉伸试样和显微硬度检测试样等。为了消除切割加工表面形貌的不良影响,针对所制备样品,先后利用#200、#400、#600、#800、#1 200、#1 500、#2 000 砂纸进行打磨,然后再进行抛光处理。非标准拉伸试样是参照国家标准 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》对金属材料拉伸试验的规定进行制备的。拉伸试验所用设备为 Zwick/Roell Z005 型万能力学试验机,试验条件为室温,采用位移控制方式,设定拉伸速度为 1 mm/min,试验数据由拉伸试验机自动记录。采用 THV-3 型显微硬度测试仪进行显微硬度检测,测试时压头压力设置为 200 g,保荷持续时间设置为 10 s,试样上每相邻 150 μm 检测 1 次。

2 实验结果与分析

2.1 熔覆成形结构抗拉强度方差分析

用方差分析评估响应曲面模型的适应度,表 5 为抗拉强度方差分析结果。如表 5 所示,设定置信水平为 95%,也就是说,当 $P \leq 0.05$ 时,对应的方差来源相对优化目标结果影响显著。以抗拉强度为优化目标时,建立优化模型的 P 值为 0.000 2,说明所选模型的拟合精度较高,适应度较好。

表 5 抗拉强度方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值	显著性
模型	51 794.77	9	5 754.97	22.04	0.000 2	显著
A 机械锤击力	25 088.00	1	25 088.00	96.09	< 0.000 1	显著
B 锤击次数	23 544.50	1	23 544.50	90.17	< 0.000 1	显著
C 锤击频率	1 250.00	1	1 250.00	4.79	0.064 9	

续表						
方差来源	平方和	自由度	均方值	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性
AB	64.00	1	64.00	0.25	0.635 7	
AC	16.00	1	16.00	0.06	0.811 6	
BC	196.00	1	196.00	0.75	0.415 0	
A ²	307.80	1	307.80	1.18	0.313 6	
B ²	129.69	1	129.69	0.50	0.503 7	
C ²	1 282.12	1	1 282.12	4.91	0.062 2	
残差	1 827.70	7	261.10			
失拟项	1 432.50	3	477.50	4.83	0.081 1	不显著
总和	53 622.47	16				

由表 5 可知,在 3 个考察因素中,机械锤击力和锤击次数为显著影响因素。固定其中某一因素,考察另外 2 个因素对抗拉强度的影响,不同因素条件下抗拉强度响应曲面及对应等高线图如图 1 所示。从图 1 可以看出,机械锤击力和锤击次数对抗拉强度的影响较大,相比之下,锤击频率的影响较小。

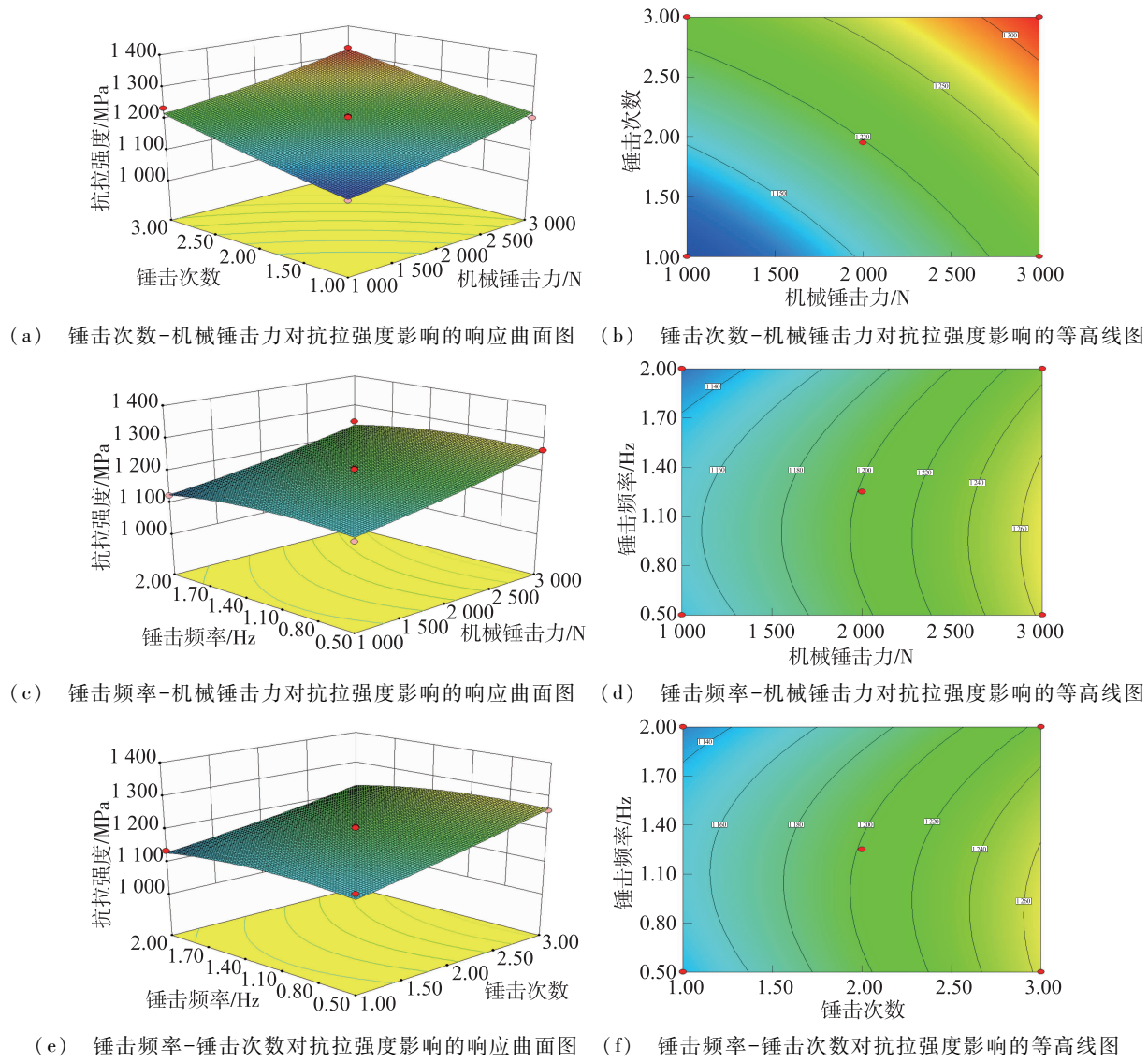


图 1 机械锤击工艺参数对熔覆成形材料抗拉强度的响应曲面

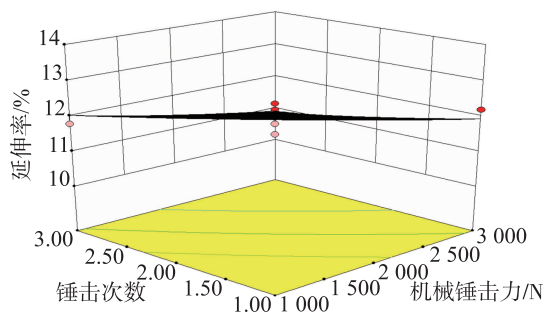
2.2 熔覆成形结构延伸率方差分析

同样采用方差分析对响应曲面模型中延伸率的适应度进行评估,其方差分析结果如表 6 所示。仍然设定置信水平为 95%,由表 6 可知,以延伸率为优化目标时优化模型的 P 值为 0.007 2,也小于 0.05,说明所选模型也具有较好的适应度。在 3 个考察因素中,机械锤击力和锤击次数为显著影响因素。

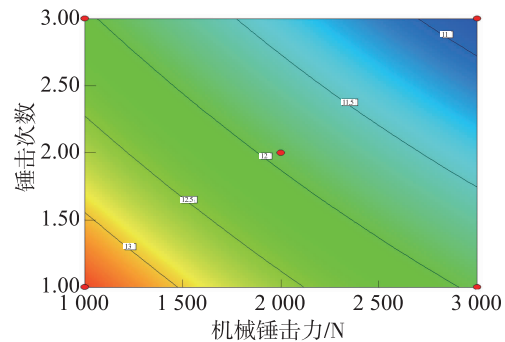
表 6 延伸率方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值	显著性
模型	6.78	9	0.75	7.53	0.007 2	显著
A 机械锤击力	3.51	1	3.51	35.09	0.000 6	显著
B 锤击次数	3.00	1	3.00	29.99	0.000 9	显著
C 锤击频率	0.18	1	0.18	1.80	0.221 7	
AB	0.022	1	0.022	0.22	0.649 8	
AC	0	1	0	0	1.000 0	
BC	0.010	1	0.010	0.100	0.761 1	
A^2	0.044	1	0.044	0.44	0.527 4	
B^2	0.012	1	0.012	0.12	0.743 4	
C^2	0.002	1	0.002	0.02	0.888 1	
残差	0.70	7	0.10			
失拟项	0.39	3	0.13	1.70	0.304	不显著
总和	7.48	16				

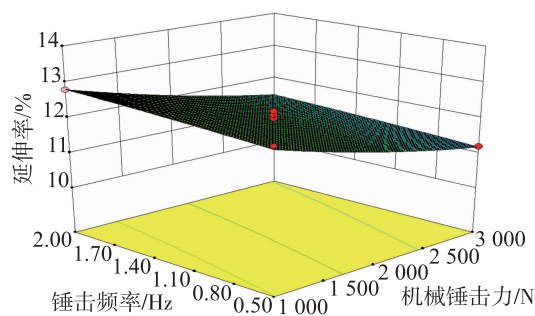
不同因素条件下延伸率响应曲面及对应等高线图如图 2 所示。从图 2 可以看出,机械锤击力和锤击次数对延伸率的影响较大,而锤击频率影响较小。



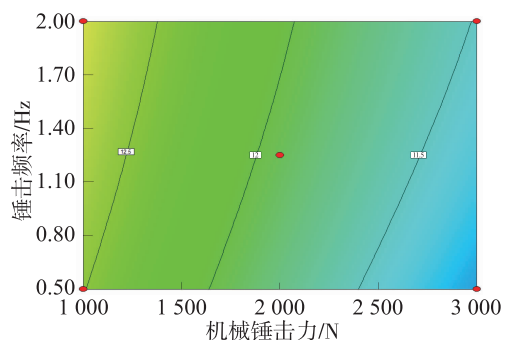
(a) 锤击次数-机械锤击力对延伸率影响的响应曲面图



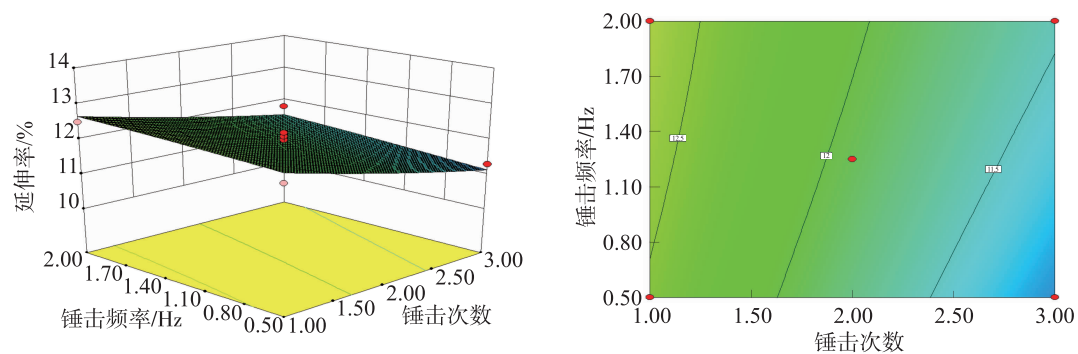
(b) 锤击次数-机械锤击力对延伸率影响的等高线图



(c) 锤击频率-机械锤击力对延伸率影响的响应曲面图



(d) 锤击频率-机械锤击力对延伸率影响的等高线图



(e) 锤击频率-锤击次数对延伸率影响的响应曲面图 (f) 锤击频率-锤击次数对延伸率影响的等高线图

图 2 机械锤击工艺参数对熔覆成形材料延伸率的响应曲面

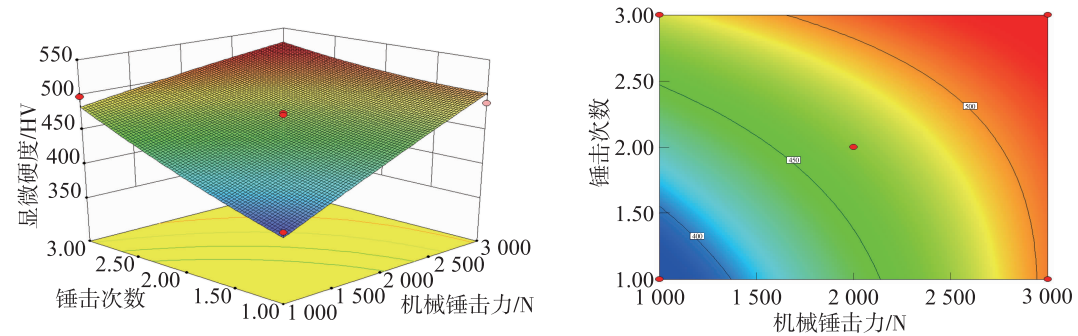
2.3 熔覆成形结构显微硬度方差分析

采用相同方法对响应曲面模型中显微硬度的适应度进行评估,其方差分析结果如表 7 所示。由表 7 可知,以显微硬度为优化目标时,优化模型的 P 值为 0.000 5,远小于 0.05,说明所选模型预测精度较高,适应度较好。在 3 个考察因素中,机械锤击力和锤击次数为显著影响因素。

表 7 显微硬度方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值	显著性
模型	26 757.52	9	2 973.06	18.27	0.000 5	显著
A 机械锤击力	14 964.50	1	14 964.50	91.97	< 0.000 1	显著
B 锤击次数	8 911.13	1	8 911.13	54.77	0.000 1	显著
C 锤击频率	136.13	1	136.13	0.84	0.390 8	
AB	1 764.00	1	1 764.00	10.840	0.013 3	
AC	25.00	1	25.00	0.150	0.706 7	
BC	0.25	1	0.25	0.002	0.969 8	
A ²	18.13	1	18.13	0.11	0.748 3	
B ²	160.55	1	160.55	0.99	0.353 6	
C ²	804.76	1	804.76	4.95	0.061 5	
残差	1 138.95	7	162.71			
失拟项	1 029.75	3	343.25			显著
总和	27 896.47	16				

不同因素条件下抗拉强度响应曲面及对应等高线图如图 3 所示。从图 3 可以看出,机械锤击力和锤击次数对显微硬度的影响较大,锤击频率影响较小。



(a) 锤击次数-机械锤击力对显微硬度影响的响应曲面图 (b) 锤击次数-机械锤击力对显微硬度影响的等高线图

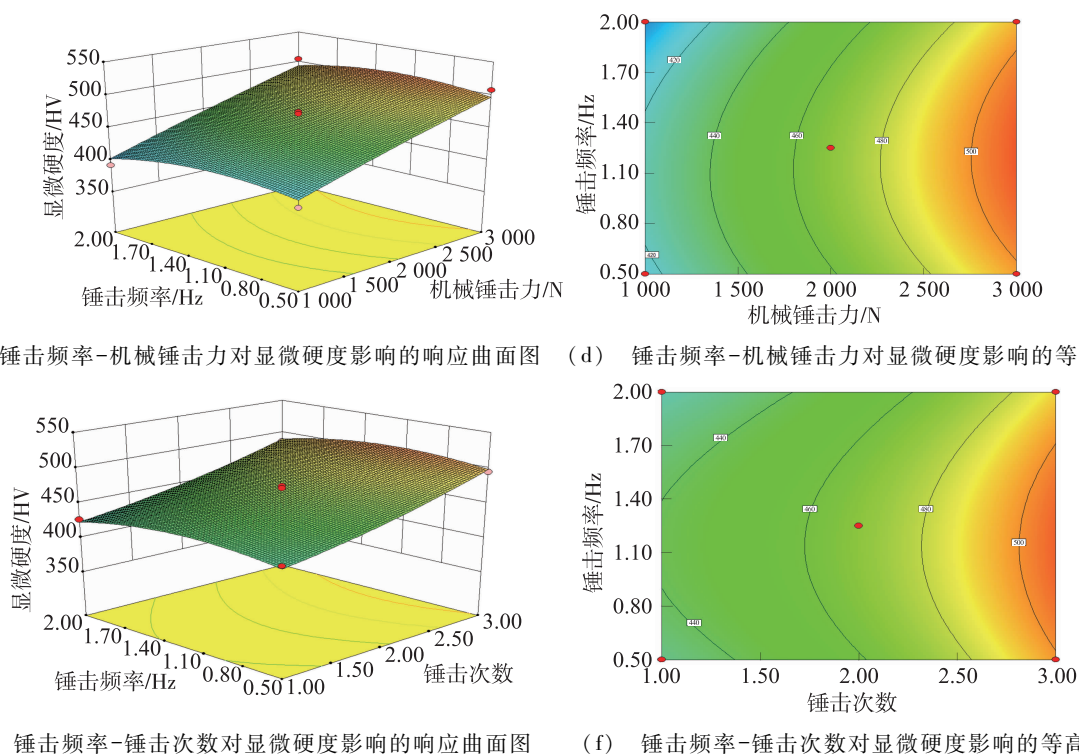


图3 机械锤击工艺参数对熔覆成形材料显微硬度的响应曲面

本文的优化目标分别是抗拉强度、延伸率和显微硬度。由于所设计机械锤击装置与激光喷头一起安装于机床 Z 轴悬臂上,反复锤击,锤击力过大时,在一定程度上将影响 Z 轴的运动精度。因此,尽管机械锤击力对优化目标为显著因素,为确保机床运动精度不受影响,制定优化原则为机械锤击力 $\leq 2\,000\text{ N}$ 。同时,锤击次数只能取整数值。期望同时获得最大的抗拉强度、延伸率和显微硬度,按照上述原则进行优化,得到其最优参数为:机械锤击力 $2\,000\text{ N}$,锤击次数 3 次,锤击频率 2 Hz ,在此工艺条件下获得的试样抗拉强度为 $1\,209\text{ MPa}$,延伸率为 11.8% ,显微硬度为 486HV ,综合力学性能最优。

3 结论

(1) 机械锤击力和锤击次数对激光熔覆成形结构的力学性能影响最大,机械锤击频率影响较小。随机械锤击力和锤击次数的增大,抗拉强度及显微硬度均呈增大趋势,而延伸率略有下降。

(2) 以抗拉强度、显微硬度和延伸率为优化目标,采用响应面分析法对机械锤击参数进行优化,获得最优参数为:机械锤击力 $2\,000\text{ N}$,锤击次数 3 次,锤击频率 2 Hz 。

参考文献:

- [1] ATTAR H, EHEMAM-HAGHIGHI S, KENT D, et al. Laser additive manufacturing of Low-Cost Ti-Mo alloys: microstructural evolution, phase analysis, and mechanical properties[J]. Advanced engineering materials, 2023, 25(6): 2201265.
- [2] 苏冰, 李佳, 张言嵩, 等. 激光增材制造难熔高熵合金研究现状与展望[J/OL]. 中国有色金属学报. [2025-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20221014.1408.001.html>.
- [3] 王军华, 许俊飞, 路妍, 等. 同轴送粉激光熔覆粉末质量分布密度模型与实验测量[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 26-35.
- [4] MOEINFAR K, KHODABAKHSHI F, KASHANI-BOZORG S F, et al. A review on metallurgical aspects of laser additive manufacturing (LAM): stainless steels, nickel superalloys, and titanium alloys[J]. Journal of materials research and technology, 2022, 16: 1029-1068.
- [5] 崔然. 激光熔化沉积马氏体不锈钢组织及性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [6] 杨义成. 燃气轮机叶片激光增材修复基础研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2017.

- [7] 宫新勇.激光熔覆沉积修复 TC11 钛合金叶片的基础问题研究[D].北京:北京有色金属研究总院,2014.
- [8] 潘浒.基于激光再制造的镍基高温合金成形质量可控性基础研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [9] TAN Z E E, PANG J H L, KAMINSKI J, et al. Characterisation of porosity, density, and microstructure of directed energy deposited stainless steel AISI 316L[J]. Additive manufacturing, 2019, 25: 286–296.
- [10] ADOMAKO N K, NOH S H, OH C S, et al. Laser deposition additive manufacturing of 17-4PH stainless steel on Ti-6Al-4V using V inter-layer[J]. Materials research letters, 2019, 7(7): 259–266.
- [11] THIRIET A, SCHNEIDER M C, LAHEURTE P, et al. Multiscale study of different types of interface of a buffer material in powder-based directed energy deposition; example of Ti6Al4V/Ti6Al4V-Mo/Mo-Inconel 718[J]. Additive manufacturing, 2019, 27: 118–130.
- [12] WANG Z Q, PALMER T A, BEESE A M. Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing[J]. Acta materialia, 2016, 110: 226–235.
- [13] ZHOU L, CHEN S Y, ZHANG C Y, et al. Microstructure evolution and properties of direct laser deposited 24CrNiMoY alloy steel assisted by non-contact ultrasonic treatment[J]. Materials science and engineering A, 2021, 811: 141088.
- [14] ZHOU L, CHEN S Y, MA M Z, et al. The dynamic recrystallization mechanism of ultrasonic power on non-contact ultrasonic-assisted direct laser deposited alloy steel[J]. Materials science and engineering A, 2022, 840: 142971.
- [15] XU J, ZHOU J, TAN W, et al. Ultrasonic vibration on wear property of laser cladding Fe-based coating[J]. Surface engineering, 2018, 36(12): 1261–1269.
- [16] ZHAO W Z, WU C S. Constitutive equation including acoustic stress work and plastic strain for modeling ultrasonic vibration assisted friction stir welding process[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2019, 145: 103434.
- [17] ZHU L D, YANG Z C, XIN B, et al. Microstructure and mechanical properties of parts formed by ultrasonic vibration-assisted laser cladding of Inconel 718[J]. Surface and coatings technology, 2021, 410: 126964.
- [18] ZHANG H, LI R, LIU J, et al. State-of-art review on the process structure properties performance linkage in wire arc additive manufacturing[J]. Virtual and physical prototyping, 2024, 19: 2390495.
- [19] LU C, SHI J. Simultaneous consideration of relative density, energy consumption, and build time for selective laser melting of Inconel 718: a multi-objective optimization study on process parameter selection[J]. Journal of cleaner production, 2022, 369: 133284.
- [20] LU C Y, SHI J. Relative density and surface roughness prediction for Inconel 718 by selective laser melting; central composite design and multi-objective optimization[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2022, 119(5): 3931–3949.
- [21] 施毅,王贤琳,张华,等.面向再制造激光熔覆工艺参数多目标优化策略[J].应用激光,2022,42(9):23–29.

[责任编辑 腰政懋]