

表面织构对模具钢激光熔覆层性能的影响分析

赵昌龙, 刘俊, 姚世航, 王阔, 王旭旭

(长春大学, 长春 130022)

摘要: **目的** 减少激光熔覆过程中产生较大的应力和裂纹的现象, 提高激光熔覆后模具钢的抗疲劳性能, 延长其使用寿命。**方法** 选取激光功率 (800、1000、1200 W)、扫描速度 (5、10、20 mm/s)、光斑半径 (0.5、0.75、1 mm) 作为激光熔覆模拟因素, 以残余应力为主要试验指标, 进行三因素三水平正交模拟试验, 并对试验结果进行信噪比及极差分析, 确定最优熔覆参数。在最优熔覆参数下, 进行预置织构及无织构的激光熔覆模拟, 对比分析两次模拟的熔覆层温度及残余应力分布。在最优参数下进行熔覆加工, 验证有效性。**结果** 正交模拟试验得出最优熔覆参数为: 激光功率 800 W, 扫描速度 20 mm/s, 光斑半径 1 mm。得到最小残余应力平均值为 360 MPa。此外, 激光功率对残余应力的影响最为显著, 其次是光斑半径, 对残余应力影响最小的是扫描速度。在最优熔覆参数下, 对预制织构的模型进行激光熔覆模拟, 得出残余应力平均值为 149 MPa。相比较于无织构熔覆模拟, 预置织构熔覆模拟的平均应力值降低了大约 58.56%。对无织构和有织构模具钢表面进行激光熔覆加工, 测量残余应力, 验证了该方法的有效性。**结论** 通过在基体预置表面织构的方法, 在保证熔覆温度的前提下, 降低了残余应力, 最终能达到降低残余应力、减少裂纹产生的目的。

关键词: 激光熔覆; 正交试验; 表面织构; 熔覆温度; 残余应力

中图分类号: TG162.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)06-0101-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.06.010

Analysis of the Influence of Surface Texture on Properties of Laser Cladding Layer on Die Steel

ZHAO Chang-long, LIU Jun, YAO Shi-hang, WANG Kuo, WANG Xu-xu

(Changchun University, Changchun 130022, China)

ABSTRACT: In order to reduce the phenomenon of greater stress and cracks during the progress of laser cladding, improve the fatigue resistance and service life after laser cladding, and extend its service life. Laser power (800, 1000, 1200 W), scanning speed (5, 10, 20 mm/s), spot radius (0.5, 0.75, 1 mm) are selected as simulation factors for laser cladding, and the residual stress is taken as the main experiment indicator during the three-factor and three-level orthogonal simulation experiments. The S/N and range analysis are performed on simulation results to determine the optimal laser cladding parameters. Comparing the cladding temperature and residual stress distribution between prefabricated texture and non-texture cladding simulation under the optimal

收稿日期: 2020-05-12; 修订日期: 2021-04-23

Received: 2020-05-12; Revised: 2021-04-23

基金项目: 吉林省科技厅自然科学基金项目 (20200201220JC)

Fund: Supported by the Natural Science Fund Project of Jilin Science and Technology Department (20200201220JC)

作者简介: 赵昌龙 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能精密制造。邮箱: zhaocl@ccu.edu.cn

Biography: ZHAO Chang-long (1979—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: intelligent precision manufacturing. E-mail: zhaocl@ccu.edu.cn

引文格式: 赵昌龙, 刘俊, 姚世航, 等. 表面织构对模具钢激光熔覆层性能的影响分析[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 101-108.

ZHAO Chang-long, LIU Jun, YAO Shi-hang, et al. Analysis of the influence of surface texture on properties of laser cladding layer on die steel [J]. Surface technology, 2021, 50(6): 101-108.

cladding parameters, and the cladding process is performed under the optimal parameters to verify its validity. The orthogonal simulation experiments show that the optimal cladding parameters of 800 W laser power, 20 mm/s scanning speed, 0.1 mm spot radius, and the minimum residual stress is 360 MPa under the optimal cladding parameters. In addition, the laser power has the most significant influence on residual stress, followed by spot radius, the scanning speed has the least influence on residual stress. The laser cladding simulation of prefabricated texture on die steel results the average residual stress of 149 MPa, which reduces by 58.56% compared with the value of non-texture cladding simulation under the optimal cladding parameters. The effectiveness of the method is verified by measuring the residual stress after the laser cladding processing on the textured and non-textured steel surface. The method of prefabricating surface texture reduces the residual stress under the premise of ensuring the cladding temperature, which verifies the feasibility and superiority of prefabricating surface texture, and finally achieving the purpose of reducing residual stress and cracks.

KEY WORDS: laser cladding; orthogonal experiments; surface texture; cladding temperature; residual stress

模具是材料成形领域中的重要工具,在制造业中发挥着不可替代的作用。由于模具本身的制造工艺复杂,加工过程工序多、生产周期长,且模具材料往往价格比较昂贵,导致模具造价非常高^[1]。此外,模具所处的工作环境复杂、恶劣,且由于各种不同的工况,导致模具失效、报废形式种类繁杂。工业生产会消耗大量的金属资源,导致金属矿产资源逐渐衰竭,因此节约金属资源显得尤为迫切而重要。在此背景下,众多学者对模具的修复技术,即再制造技术展开了研究,常用的再制造方法有电火花、电弧堆焊、热喷涂及激光熔覆等^[2-6]。其中,激光熔覆技术由于具有熔覆层组织致密、稀释率低、热影响区小等优点而被广泛采用。

唐琪等人^[7]通过对 H13 模具钢进行激光熔覆过程的模拟,研究不同扫描长度的热积累及其对熔池形貌(熔池长度、宽度及深度)的影响。操森顺等人^[8]在优化激光熔覆铁基合金工艺参数的基础上,利用有限元对不同参数下的温度场分布进行了动态模拟,并对熔覆层形状和性能进行了检测。李强等人^[9]采用有限元分析方法对变壁厚零件进行温度场及应力场模拟,分析了不同壁厚区域在激光熔覆时的温度分布及应力分布。刘军等人^[10]采用圆形和矩形光斑,研究不同激光功率、扫描速度及送粉速率的工艺参数对熔覆层宏观形貌的影响。王丽等人^[11]利用有限元模拟激光熔覆预置粉末制备 YSZ 热障涂层的温度场、应力场,分析了工艺参数对温度场的影响,并揭示了温度场对熔凝行为的影响机理。Vikas 等人^[12]通过光纤激光熔覆将 h-BN 及 SS316 复合涂层添加在 SS316 基板表面,检查复合涂层的表面形貌及微观结构发现,熔覆层与基体之间具有良好的冶金结合。Alireza 等人^[13]对在 321 不锈钢基体上熔覆的 WC-FeAl 粉末进行了研究,主要分析熔覆参数(包括激光功率、探针速度、粉末喷涂速率)对涂层性能的影响。Grzegorz 等人^[14]通过研究 962 粉末熔覆在 625 镍基合金上,发现熔覆层中含有裂纹和气孔。然而,关于通过改变基体与熔覆层连接结构,来降低激光熔覆产生的应力,减少裂

纹的产生,却鲜有报道。

本文利用 ANSYS 有限元仿真软件,对 H13 模具钢进行单层三道激光熔覆模拟。模拟过程中,采用体生热率进行热源的加载,分析激光熔覆过程中温度场的分布,并将温度场模拟结果作为载荷进行间接耦合,计算出熔覆层的应力场分布情况。通过在基体模型上预置凹坑织构,对有、无织构的基体进行同等条件的激光熔覆模拟,求解出温度场及应力场的分布结果,并将两者结果进行对比分析,寻求一种有效减低应力、减少裂纹产生的新型激光熔覆方法。

1 正交模拟试验设计

本次模拟试验中,选用正交试验方法^[15-17]对激光熔覆过程进行优化分析,寻求最优解。选取激光功率、扫描速度、光斑半径三个因子为试验因素,熔池宽度及深度、残余应力为试验指标,其中残余应力为主要指标,设计三因素三水平正交模拟试验^[18-20]。激光功率三个水平为 800、1000、1200 W,扫描速度三个水平为 5、10、20 mm/s,光斑半径三个水平为 0.5、0.75、1 mm,正交试验表设计如表 1 所示。

表 1 正交模拟试验表
Tab.1 Orthogonal simulation table

Order	Laser power/W	Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Spot radius/mm
1	800	5	0.5
2	800	10	0.75
3	800	20	1
4	1000	5	0.75
5	1000	10	1
6	1000	20	0.5
7	1200	5	1
8	1200	10	0.5
9	1200	20	0.75

2 模型构建

2.1 材料性能参数

激光熔覆模拟过程属于瞬态热分析，材料的热物性性能参数（如比热容、热导率等）都随着温度的变化而变化。本次选用的基体材料为 H13 钢，熔覆层材

料为 Ni60A 合金粉末。由文献[21-22]可知，H13 钢和 Ni60A 合金随温度变化的热物性性能参数如表 2—表 5 所示。H13 钢材料密度为 7760 kg/m³，弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3，熔点为 1300 ℃；Ni60A 合金材料密度为 8900 kg/m³，弹性模量为 180 GPa，泊松比为 0.24，粉末熔化温度范围为 960~1040 ℃。

表 2 H13 钢热物理性能参数
Tab.2 Thermophysical properties of H13 steel

Temperature/℃	20	200	350	500	600	650
Heat conductivity/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	32.2	28.6	28.4	—	—	28.8
Heat capacity/(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	460	—	—	548	590	—

表 3 H13 钢线膨胀系数
Tab.3 Linear expansion coefficient of H13 steel

Temperature/℃	100	200	300	400	500	600
Linear expansion coefficient/(×10 ⁶ ℃ ⁻¹)	9.1	10.3	11.5	12.2	12.8	13.2

表 4 Ni60A 合金热物理性能参数
Tab.4 Thermal physical properties of Ni60A alloy

Temperature/℃	300	400	600	700	800	1200	1400	1600	1800
Heat conductivity/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	90	83	67	65	68	74	79	82	86
Heat capacity/(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	428	460	520	526	538	533	533	533	533

表 5 Ni60A 合金线膨胀系数
Tab.5 Linear expansion coefficient of Ni60A alloy

Temperature/℃	300	500	700	800	950
Linear expansion coefficient/(×10 ⁶ ℃ ⁻¹)	13.5	13.8	14.0	14.2	14.4

2.2 模型建立

本文模拟三道单层激光熔覆进行温度场及应力场耦合分析，采用 ANSYS 自带建模模块建立激光熔覆有限元模型，如图 1 所示。激光熔覆模拟的模型为对称模型，只需建立对称模型的一半。基体模型尺寸

为 50 mm×25 mm×20 mm，熔覆层模型尺寸为 50 mm×6 mm×0.5 mm。模型网格划分采用局部细化划分，基体材料的网格划分尺寸为 0.001 mm，熔覆层材料的网格划分尺寸为 0.0005 mm，选取的单元类型为 solid70，该单元具有三向热传导能力。模型网格划分如图 2 所示。

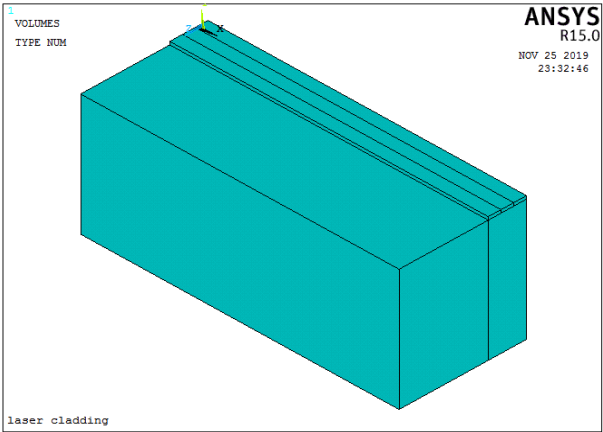


图 1 激光熔覆有限元模型图
Fig.1 Finite element model of laser cladding

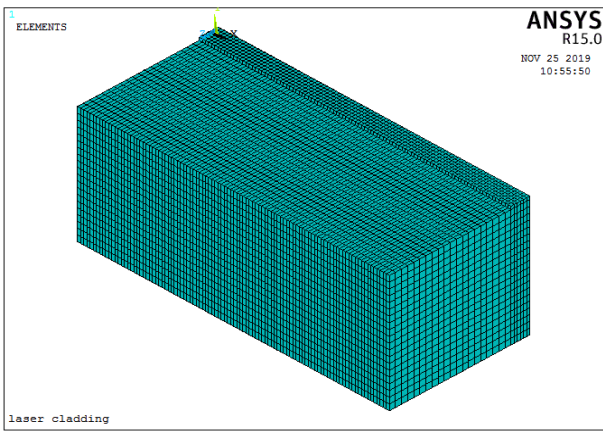


图 2 模型网格划分图
Fig.2 Model meshing diagram

2.3 热源模型及边界条件

热源的施加采用高斯体热源模型, 热传导控制方程^[23]为:

$$\rho C \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (-v) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; C 为比热容; v 为扫描速度; T 为温度; t 为时间; k 为热导率。有限元模拟过程中采用对流换热边界条件, 不考虑热辐射对模拟过程的影响, 对流换热^[24]公式为:

$$q^* = h(T_s - T_B) \quad (2)$$

式中, h 为对流换热系数, 取 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; T_s 为固体表面的温度; T_B 为周围环境温度, 取 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

此外, 丁林等人^[25]研究了预热温度对激光熔覆应力的影响, 发现基体预热对于残余应力存在很大的影响。随着基体预热温度的增加, 无论是基体, 还是熔覆层, 表面的残余应力均降低, 并且预热会使得残余应力分布更加均匀。因此, 本文在熔覆模拟过程中, 对基体材料进行预热, 预热温度为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 结果及分析

激光熔覆模拟路径为 S 型, 第一道由左至右, 第二道由右至左, 第三道再由左至右。每完成一道路径的熔覆模拟后, 冷却 20 s , 直至完成单层三道熔覆模拟过程。正交模拟试验选取了熔池深度及宽度、残余应力为试验指标, 结果如表 6 所示。选取中间道基体和熔覆层连接面的残余应力作为计算结果。

表 6 正交模拟试验结果
Tab.6 Orthogonal simulation results

Laser power/W	Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Spot radius/mm	The depth of molten pool/mm	The width of molten pool/mm	Residual stress/MPa	S/N
800	5	0.5	2.1	3.1	640	-56.12
800	10	0.75	1.2	2.4	530	-54.49
800	20	1	1.1	2.2	360	-51.13
1000	5	0.75	2	4.5	755	-57.56
1000	10	1	1.3	3.5	521	-54.34
1000	20	0.5	1.4	2.8	538	-54.62
1200	5	1	2.5	6	672	-56.55
1200	10	0.5	1.9	3.8	822	-58.30
1200	20	0.75	1.5	3	740	-57.38

信噪比描述了电子系统中信号与噪声的比例高低, 信噪比越大, 信号越强, 噪声越小, 输出值与期望值的误差就越小。在得到正交模拟试验结果之后, 通过信噪比分析方法对模拟数据进行分析, 找出稳定的最佳熔覆参数。信噪比计算公式^[26]如下所示:

$$S/N = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i^2 \right) \quad (3)$$

式中, n 为模拟试验次数, F_i 为第 i 次模拟试验的残余应力值。

由表 6 结果分析得出, 各组模拟试验的熔池深度均已超过熔覆层的厚度, 达到熔覆的效果, 且残余应力的最小值出现在激光功率 800 W 、扫描速度 20 mm/s , 光斑半径 1 mm 的熔覆条件下, 最小残余应力值为 360 MPa 。

在熔覆层达到必要的熔覆温度的前提下, 本文选取残余应力作为主要试验指标进行分析, 残余应力的极差分析结果如表 7 所示, 表中激光功率对应的 P_{j1} 代表其处于水平 1 ($P=800 \text{ W}$) 时模拟试验残余应力值的信噪比总和, 各信噪比值为 -56.12 、 -54.49 、

-51.13 , 因此 P_{j1} 值为 -161.74 , 剩余极差分析值均依据此方法计算得出。最终得出最优参数组合为 $P1V3R3$, 即激光功率为 800 W , 扫描速度为 20 mm/s , 光斑半径为 1 mm , 得到最小残余应力值为 360 MPa 。由此可以看出, 极差分析结果与正交模拟试验分析结果一致。此外, 三因素中, 激光功率对残余应力的影响最为显著, 其次是光斑半径, 对残余应力影响最小的是扫描速度。

表 7 残余应力极差分析结果
Tab.7 Residual stress range analysis results

Parameters	S/N		
	Laser power P	Scanning speed V	Spot radius R
P_{j1}	-161.74	-170.23	-169.04
P_{j2}	-166.52	-167.13	-169.43
P_{j3}	-172.23	-163.13	-162.02
Optimal	$P1$	$V3$	$R3$
R_j	10.49	7.10	7.41
Order	$P>R>V$		

在最优熔覆条件下, 完成三道单层熔覆模拟输出的温度场分布如图 3 所示。根据熔覆路径, 选取每一道基体和熔覆层连接面的起点、中点、终点, 进行熔覆层温度随时间变化的研究, 各节点温度随时间的变化曲线如图 4 所示。

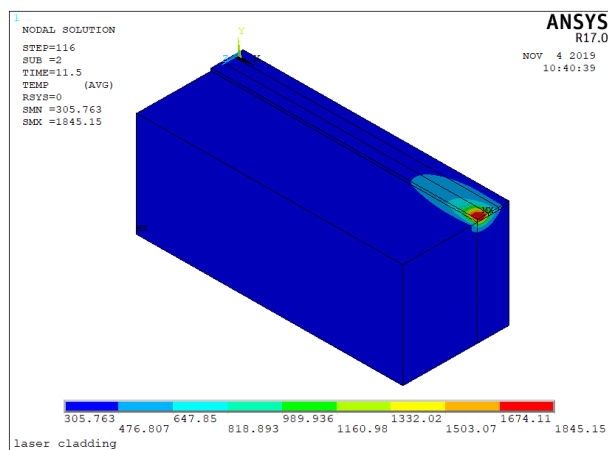


图 3 温度场分布
Fig.3 Temperature distribution diagram

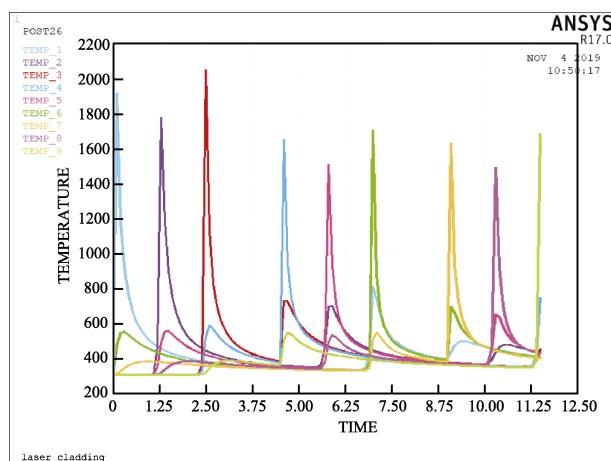


图 4 节点温度随时间的变化
Fig.4 Curve of node temperature over time

从图 4 可以看出, 即将到达各节点时, 该节点温度快速上升, 之后温度便快速下降。熔覆过程中, 节点最高温度达到 2050 °C, 且其余各节点均已达到材料的熔点。

将温度场分析结果作为载荷读入, 并转换单元类型后, 进行应力场的分析, 输出应力场分布如图 5 所示。选取中间道基体和熔覆层连接面的应力场作为研究对象进行分析, 中间道沿路径分布的应力曲线如图 6 所示。

从图 5 可以看出, 最大应力值为 2490 MPa, 出现在第一道末端的基体与熔覆层连接面上。从图 6 可以看出, 中间道的最大应力值处于熔覆层的端面, 最大值为 587.47 MPa。熔覆层中间段的应力值在 325~400 MPa 波动, 且波动较小, 平均应力值为 360 MPa。

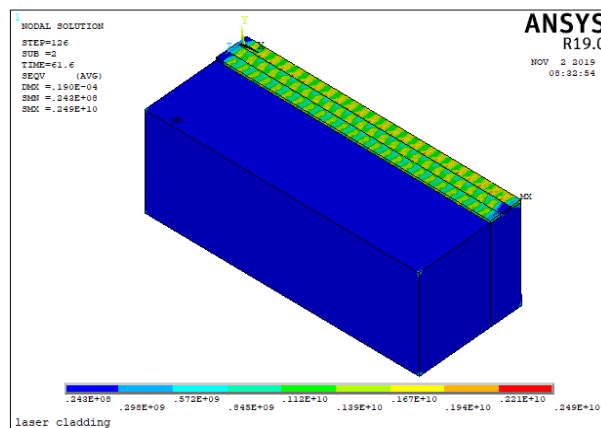


图 5 应力场分布
Fig.5 Stress distribution diagram

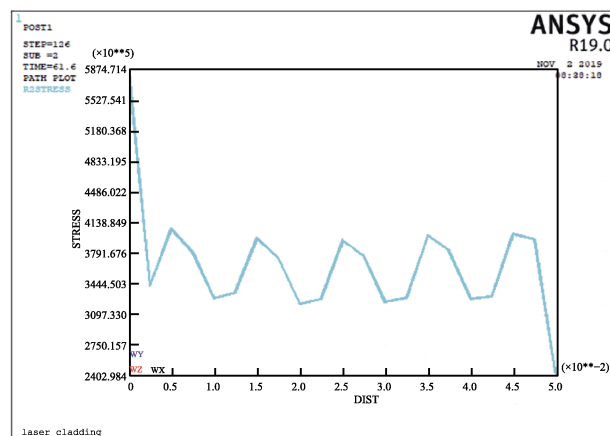


图 6 中间道应力分布曲线
Fig.6 Middle channel stress distribution curve

4 织构对激光熔覆的影响分析

4.1 织构模型建立

织构模型尺寸与无织构模型尺寸保持一致, 基体模型上表面的织构分布如图 7 所示。织构的形状为长方体, 其尺寸设置为 0.8 mm×0.8 mm×0.5 mm。预置织构之后, 在织构中填满 Ni60A 合金粉末材料, 并在基体模型上建立熔覆层, 依旧选择 solid70 单元, 对模型进行局部细化网格划分, 模型网格划分结果如图 8 所示。由于熔覆层及其附近区域存在织构, 即为非规则体, 因此网格划分采用非结构网格划分, 熔覆层网格尺寸为 0.0005 mm, 其余区域网格尺寸均为 0.001 mm。

4.2 模拟结果分析

在最优熔覆条件下 (激光功率 800 W、扫描速度 20 mm/s、光斑半径 1 mm), 采用同样的热源模型及边界条件进行三道单层的织构熔覆模拟, 输出温度场分布如图 9 所示。选取每一道基体和熔覆层连接面的起点、中点、终点, 进行熔覆层温度随时间变化的研究, 各节点温度随时间变化的曲线如图 10 所示。

从图 10 可以看出,各节点温度变化趋势与无织构模拟变化趋势一致,熔覆过程中,节点最高温度达到 2150 °C,且其余节点温度均达到材料的熔点。预置织构熔覆模拟的温度场分布与无织构模拟的温度场分布差异并不明显。

预置织构熔覆模拟输出应力分布如图 11 所示,选取中间道基体和熔覆层连接面的应力场进行分析,

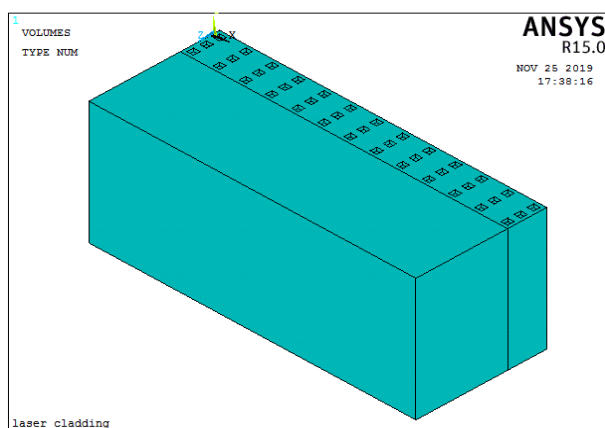


图 7 基体织构模型图
Fig.7 Matrix texture model diagram

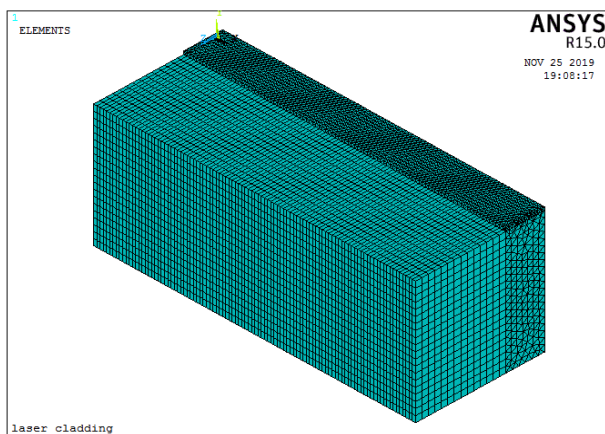


图 8 织构模型网格划分图
Fig.8 Texture model mesh division diagram

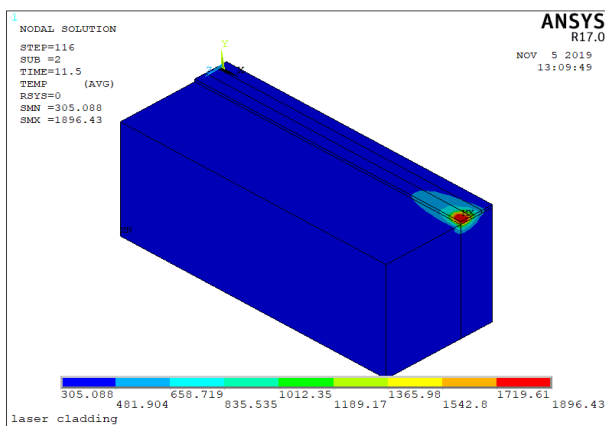


图 9 带织构熔覆温度场温度场分布
Fig.9 Temperature distribution diagram of cladding with texture

中间道沿路径分布的应力曲线如图 12 所示。

从图 11 可以看出,最大应力值为 1440 MPa,相较于无织构的应力最大值 2490 MPa,降低了 42.17%,且其最大值同无织构模拟的最大值均出现在第一道末端的基体与熔覆层连接面上。从图 12 可以看出,

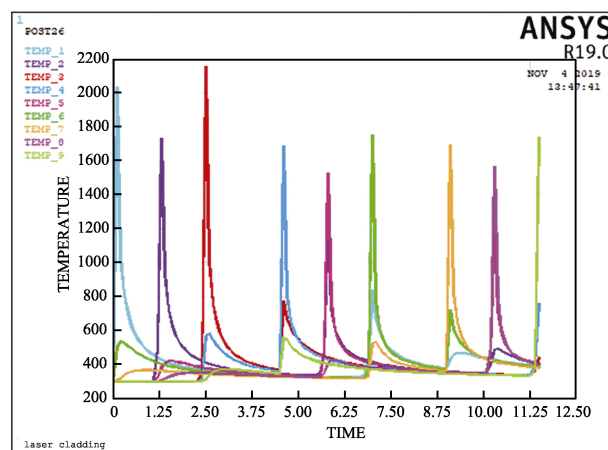


图 10 带织构熔覆节点温度随时间的变化
Fig.10 Curve of node temperature over time of cladding with texture

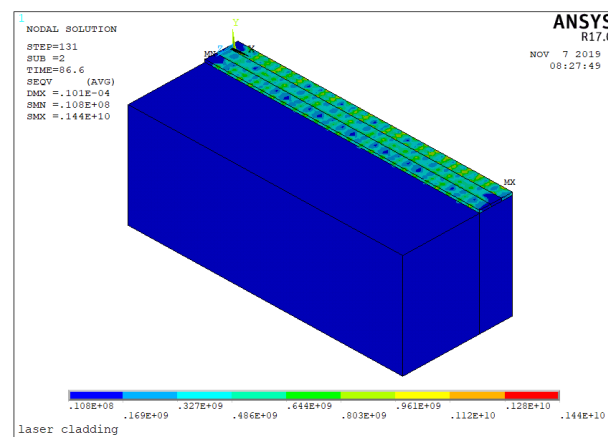


图 11 带织构熔覆应力场分布
Fig.11 Stress distribution diagram of cladding with texture

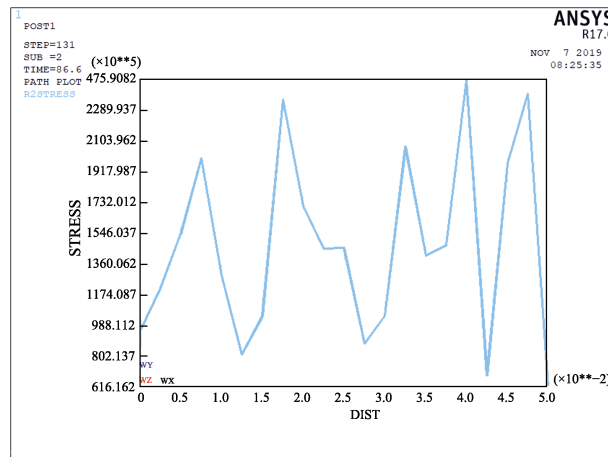


图 12 带织构熔覆中间道应力分布曲线
Fig.12 Curve of middle channel stress distribution of cladding with texture

中间道应力最大值转移到距离熔覆层末端 10 mm 的地方，两端应力值分别为 90 MPa 和 61.6 MPa。相比较于无织构熔覆模拟的熔覆层两端应力值 587.47 MPa 和 240.29 MPa，分别降低了 84.68%和 74.36%，熔覆层的应力值在 61.6~247.59 MPa 波动，平均应力值为 149 MPa。可以发现，相比较于无织构熔覆模拟，预置织构熔覆模拟的平均应力值降低了大约 58.56%。

4.3 激光熔覆加工试验

熔覆试验采用前文所用基体材料 H13 钢，熔覆层材料为 Ni60A 合金粉末，在仿真最优熔覆条件(激光功率 800 W、扫描速度 20 mm/s、光斑半径 1 mm)下，采用同样热源模型及边界条件进行无织构及有织构激光熔覆加工，测量熔覆后工件残余应力值并进行

对比。残余应力选用加拿大 PROTO 公司生产的 iXRD 型残余应力分析仪测量，测量界面如图 13 所示。

经测量，有织构工件的最大应力值为 1280 MPa，相比较于无织构工件的应力最大值 2065 MPa，降低了 38.02%，有织构工件中间道应力最大值转移到距离熔覆层末端 10 mm 的地方，两端应力值分别为 126.52 MPa 和 85.6 MPa，相比较于无织构熔覆模拟的熔覆层两端应力值 550.32 MPa 和 220.19 MPa，分别降低了 77.01%和 61.13%。有织构熔覆层平均应力值为 198 MPa，相比较于无织构熔覆模拟的平均应力值 481.22 MPa，降低了大约 49.35%。变化趋势与模拟仿真相似，证明了基于有织构材料表面的激光熔覆对于降低残余应力的有效性。

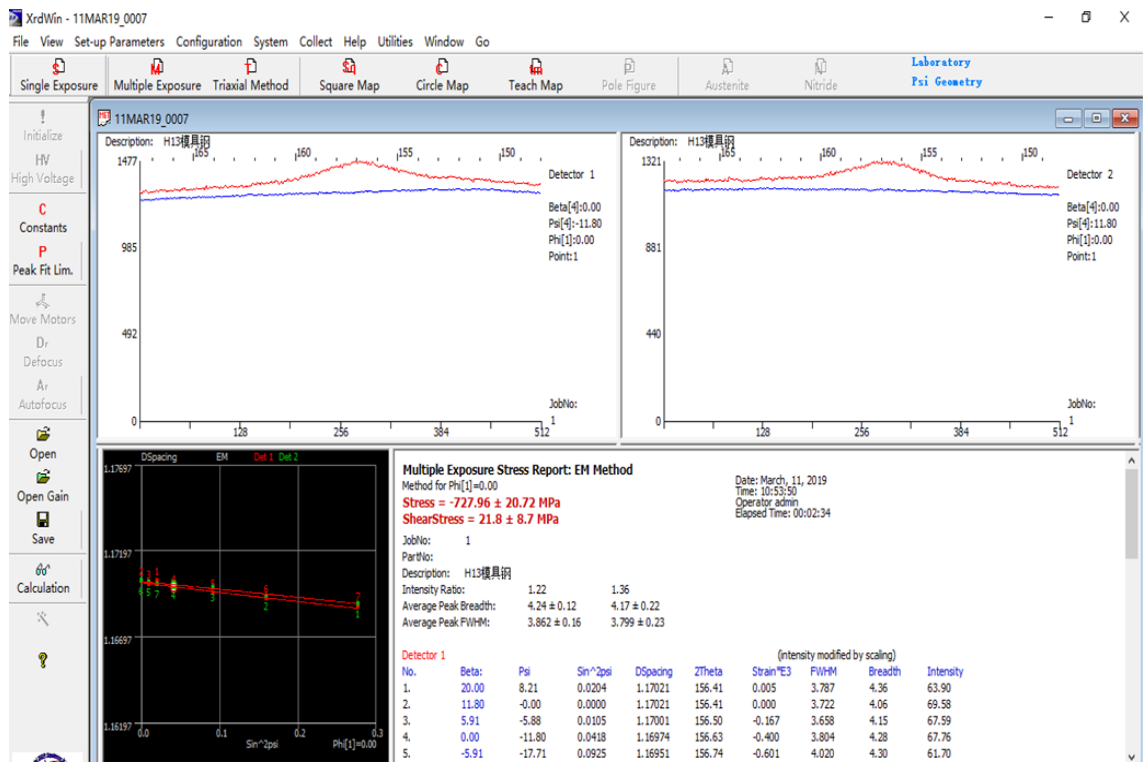


图 13 残余应力测量界面
Fig.13 Residual stress measurement interface

5 结论

- 1) 选取激光功率 (800、1000、1200 W)、扫描速度 (5、10、20 mm/s)、光斑半径 (0.5、0.75、1 mm) 为试验因素，残余应力为试验指标，设计正交模拟试验，通过信噪比及极差分析方法确定最优熔覆参数为：激光功率 800 W、扫描速度 20 mm/s、光斑半径 1 mm。输出平均残余应力值为 360 MPa。
- 2) 极差分析结果表明，激光功率对残余应力的影响最为显著，其次是光斑半径，扫描速度对残余应力的影响最小。
- 3) 针对基体模型表面预置尺寸为 0.8 mm×0.8 mm×

0.5 mm 的长方体凹坑织构，填充 Ni60A 合金粉末进行激光熔覆模拟，将无织构与预置织构熔覆模拟的温度及应力场进行对比分析，发现两次模拟的温度场差异并不明显，且模拟过程中各节点温度均能达到材料的熔点，顺利完成了熔覆过程。预置织构熔覆模拟输出的平均残余应力值为 149 MPa，相较于无织构模拟的应力值，降低了大约 58.56%，熔覆试验加工所测量的残余应力结果变化趋势与仿真相似。

通过模拟仿真、加工试验及上述总结可得知，表面预置织构在很大程度上减低了残余应力，减少了裂纹的产生，为改善激光熔覆层的应力状态提供了一个有效的新方法。

参考文献:

- [1] 崔巍. 数控加工技术在机械模具制造中的应用分析[J]. 电子世界, 2020(9): 155-156.
CUI Wei. Application analysis of CNC machining technology in mechanical die manufacturing[J]. Electronics world, 2020(9): 155-156.
- [2] 赵运才, 刘宗阳, 杨雷雷. 弧比变化对电火花沉积 Ni201 修复层界面行为的影响[J]. 中国机械工程, 2016, 27(10): 1399-1403.
ZHAO Yun-cai, LIU Zong-yang, YANG Lei-lei. Effects of different arc rates on interface behavior of Ni201 repaired layers by electric spark deposition[J]. China mechanical engineering, 2016, 27(10): 1399-1403.
- [3] 毛志伟, 黄涛, 周少玲. 旋转电弧 GMAW 堆焊短路过渡熔池动态仿真[J]. 焊接学报, 2020, 41(1): 44-49.
MAO Zhi-wei, HUANG Tao, ZHOU Shao-ling. Dynamic simulation of GMAW short circuiting transfer pool in rotating arc surfacing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(1): 44-49.
- [4] 赵阳, 朱锦鹏, 郝振华, 等. 感应等离子体球化热喷涂粉体材料研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 81-90.
ZHAO Yang, ZHU Jin-peng, HAO Zhen-hua, et al. Research progress in inductive plasma spheroidized powder materials for thermal spraying[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 81-90.
- [5] KHORRAM A, JAMALOEI A D, JAFARI A, et al. Microstructural evolution of laser-clad $75\text{Cr}_3\text{C}_2+25(80\text{Ni}20\text{Cr})$ powder on Inconel 718 superalloy[J]. Journal of materials processing technology, 2020, 284: 116735.
- [6] 李守彪, 万明奇, 沈亮, 等. 激光熔覆 Ni 基纳米复合涂层的冲蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 119-126.
LI Shou-biao, WAN Ming-qi, SHEN Liang, et al. Seawater erosion-corrosion resistance of Ni-based composite coatings by laser cladding[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(4): 119-126.
- [7] 唐琪, 陈静青, 陈鹏, 等. 基于有限元的激光增材过程熔化热积累模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 100-104.
TANG Qi, CHEN Jing-qing, CHEN Peng, et al. Finite element simulation of melting heat accumulation in laser additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(7): 100-104.
- [8] 操顺森. 3D 激光熔覆铁基合金温度场模拟与试验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
CAO Shun-sen. Simulation of temperature field and experimental study of 3D laser cladding Fe-based alloy[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [9] 李强. 变壁厚零件激光熔覆中温度/应力场模拟及工艺研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
LI Qiang. Simulation of temperature/stress field in laser cladding of variable wall thickness parts and research on process[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.
- [10] 刘军. 基于不同光斑激光熔覆的数值模拟及试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
LIU Jun. Numerical simulation and experimental study of laser cladding with different laser spot[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [11] 王丽. 激光熔覆 YSZ@Ni 涂层的温度场和应力场有限元研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
WANG Li. Finite element study of temperature field and stress field of laser cladding YSZ@Ni coating[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [12] KUMAR V, RAKSHIT R, DAS A K. Mechanical and tribological performance of fiber laser clad h-BN+SS316 composite on SS316 surface[J]. Journal of materials processing technology, 2020, 278: 116509.
- [13] MOSTAJERAN A, SHOJA-RAZAVI R, HADI M, et al. Evaluation of the mechanical properties of WC-FeAl composite coating fabricated by laser cladding method[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2020, 88: 105199.
- [14] MOSKAL G, NIEMIEC D, CHMIELA B, et al. Microstructural characterization of laser-cladded NiCrAlY coatings on Inconel 625 Ni-based superalloy and 316L stainless steel[J]. Surface and coatings technology, 2020, 387: 125317.
- [15] 陶洪建, 许虎. 基于正交设计的 BP 神经网络上覆岩层移动研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(10): 280-281.
TAO Hong-jian, XU Hu. Research on overlying strata movement based on orthogonal design BP neural network[J]. Coal technology, 2016, 35(10): 280-281.
- [16] MEHTA P K, BHATIA S K, BHATIA R K, et al. Enhanced production of thermostable amidase from *Geobacillus subterraneus* RL-2a MTCC 11502 via optimization of physicochemical parameters using Taguchi DOE methodology[J]. Biotech, 2016, 6(1): 66.
- [17] AKBARZA D H E, PICAS J A, BAILE M T. Orthogonal experimental design applied for wear characterization of aluminum/Csf metal composite fabricated by the thixomixing method[J]. International journal of material forming, 2015, 9(5): 1-12.
- [18] 叶四友, 刘建永, 杨伟. H13 钢表面激光熔覆 H13 合金涂层质量研究[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 81-85.
YE Si-you, LIU Jian-yong, YANG Wei. Quality of H13 alloy coating on H13 steel prepared by laser cladding[J]. Surface technology, 2015, 44(8): 81-85.
- [19] 陈峰. H13 钢激光熔覆工艺参数优化研究[D]. 常州: 江苏理工学院, 2017.
CHEN Feng. Research on optimization of laser cladding process parameters of H13 steel[D]. Changzhou: Jiangsu University of Technology, 2017.
- [20] 陈翔, 张德强, 孙文强, 等. 扫描速度对激光熔覆薄板高速钢变形与组织的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(9): 150-157.
CHEN Xiang, ZHANG De-qiang, SUN Wen-qiang, et al. Effect of scanning speed on deformation and microstructure of thin plate high-speed steel by laser cladding[J]. Surface technology, 2019, 48(9): 150-157.

(下转第 192 页)