

表面织构对 H13 模具钢激光熔覆残余应力影响分析^{*}

赵昌龙, 于子策, 杜伟龙, 张自豪, 白宇阳, 张书豪

(长春大学机械与车辆工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 在 H13 模具钢多层激光熔覆过程中, 通过预置表面织构以降低激光熔覆后模具钢熔覆层的残余应力, 减少其裂纹的产生。首先, 对待加工表面进行预处理, 预置正方形表面织构, 并利用 Ansys 软件 APDL 语言模拟激光熔覆过程, 对熔覆过程中的温度场和应力场进行了耦合分析研究; 其次, 结合正交实验模拟结果研究预置织构对激光熔覆层温度场和残余应力的影响; 最后, 进行实验测定。研究结果表明, 对正交仿真实验结果进行均值化分析可知, 最优熔覆参数为激光功率 $P=400\text{ W}$, 扫描速率 $v=20\text{ mm/s}$, 激光光斑半径 $R=0.8\text{ mm}$, 影响熔覆层残余应力的影响程度顺序依次为激光功率>激光光斑半径>扫描速率。将最优参数下有、无织构的仿真及实际加工结果进行对比, 仿真结果中有织构激光熔覆后工件表面的残余应力降低了 25.96%, 实际熔覆后有织构工件表面的残余应力 18.55%。因此通过在 H13 模具钢基体表面预置织构的方法, 可以降低熔覆层残余应力, 从而减少或消除裂纹的产生, 在利用激光熔覆进行模具再制造过程中可以起到积极有效的作用。

关键词: 残余应力; 激光熔覆; 表面织构; 有限元分析; H13 模具钢

中图分类号: TG162.4

文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mmt.1005-2402.2025.01.003



全文在线

Analysis of the effect of surface texture on the residual stress of laser cladding H13 die steel

ZHAO Changlong, YU Zice, DU Weilong, ZHANG Zihao, BAI Yuyang, ZHANG Shuhao

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Changchun University, Changchun 130022, CHN)

Abstract: In the process of multi-layer laser cladding of H13 die steel, the residual stress of the cladding layer after laser cladding is reduced by presetting the surface texture. Firstly, the surface was pretreated, the square surface texture was preconfigured, and the laser cladding process was simulated by the APDL language of Ansys software, and the temperature field and stress field in the cladding process were analyzed and studied. Secondly, the influence of preset texture on the temperature field and residual stress of the laser cladding layer is studied by orthogonal simulation results. Finally, the experiment was carried out. The research results show that the average analysis of the orthogonal simulation experiment results shows that the optimal cladding parameters are laser power $P = 400\text{ W}$, scanning speed $v = 20\text{ mm/s}$, and laser beam radius $R = 0.8\text{ mm}$, and the sequence of factors affecting residual stress of cladding layer is laser power > laser beam radius > scanning speed. A comparison between the results of simulations and the actual processing results under optimal parameters showed a 25.96% reduction in residual stress on the surface of cladged workpieces with textures compared to those without textures in simulations, and an 18.55% reduction in residual stress on the surface of cladged workpieces with

^{*} 吉林省自然科学基金项目“表面织构及超声波辐射对激光熔覆层力学性能影响研究”(20240101088JC)



textures compared to those without textures in actual processing. Therefore, the application of pre-setting textures on the surface of H13 mold steel has been demonstrated to effectively reduce residual stress within the cladding layer, thereby minimizing or eliminating crack formation. This has been shown to play a positive and effective role in the mold remanufacturing process using laser cladding.

Keywords: residual stress; laser cladding; surface texture; finite element analysis; H13 mold steel

模具在现代制造业的发展中扮演着至关重要的角色,尤其是在汽车、机械、冶金、建材及轻工业等领域被广泛应用。其设计与制造可以决定产品研发周期的长短、投产后产品质量的稳定性、产品生产效率和企业的经济效益等^[1]。然而,模具(特别是金属模具)常常作用于恶劣的环境中,其表面承受周期性的交替载荷,导致局部区域产生应力集中,进而出现磨损或断裂等表面失效现象,最终使其报废。因此,对模具失效表面进行修复,延长其使用寿命,降低生产成本,具有十分重要的意义^[2]。目前,模具修复技术的发展主要集中在电弧堆焊、电刷镀、热喷涂和激光熔覆等方面^[3]。这些技术各有千秋,但它们也存在各自的局限性,如电弧堆焊^[4]存在稀释率较高、热影响区大、裂纹等缺陷,容易引起模具基体变形;电刷镀需要人工操作,很难实现高效率的大批量、自动化生产,效率低下;热喷涂^[5]在模具表面强化、修复中的应用相对有限。相比之下,激光熔覆技术因其热影响区小、加热速度快、结合强度高等优点^[6],在模具钢修复领域得到了广泛应用。而激光熔覆过程中熔覆层的残余应力所导致的裂纹成为研究的焦点。因此,如何有效地遏制激光熔覆过程中熔覆层裂纹扩展进而对模具进行有效修复具有十分重要的意义。

近年来,激光熔覆模具钢^[7]的研究在国内外得到了广泛关注。国内研究主要集中在激光功率、扫描速度等工艺参数的优化^[8-9],研究者们尝试不同合金元素的添加,如钒(V)、钛(Ti)等,以改善熔覆层的硬度和耐磨性。有些研究则着重于纳米颗粒的添加,提升熔覆层的综合性能。国外研究注重开发新型的熔覆材料,包括高熵合金^[10-11]、功能梯度材料等,以提升熔覆层的性能。同时,国外学者在激光熔覆过程的模拟与数值分析方面进行深入研究,通过有限元分析模拟熔池的温度场和应力场,预测熔覆层的残余应力和变形行为,从而指导工艺参数的优化^[12]。综上所述,激光熔覆技术在模具钢表面改性中的应用前景广阔,国内外的研究在不断推进这项技术的发展和完善。目前,模具激光熔覆

及其有限元分析的问题主要集中在激光熔覆参数如何影响熔覆层的几何形状和质量,如何通过参数调整控制残余应力,以及如何通过三维模拟技术分析熔覆过程中的温度场和应力场等。如 KATTIRE P 等^[13]研究了 H13 模具钢的激光熔覆实验,在已沉积 CPM9V 的 H13 模具钢钢板上,修复表面受损的模具钢,研究激光熔覆参数对熔覆层几何形状和熔覆质量的影响。JAVID Y 等^[14]通过非耦合有限元模型,模拟了铬镍铁合金 718 上碳化钨的激光熔覆过程,分析了激光功率和速度对残余应力的影响。舒林森等^[15]模拟分析铣刀盘激光熔覆修复过程中的温度和应力场,以预测热应力裂纹的风险。

本文旨在通过在模具钢基体表面预置正方形织构,并结合仿真与实验熔覆的方法,对激光熔覆过程中的温度场和应力场进行耦合分析,以此来降低熔覆层的残余应力,减少裂纹形成,从而提高模具修复的效率和质量。通过这种方式,为模具钢的激光熔覆修复提供最优参数,同时探索预置表面织构对减轻熔覆层残余应力的潜在影响。

1 有限元模型的建立

1.1 数学模型

激光熔覆过程满足三维瞬态导热控制方程(在域 Ω 内)^[16]为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho Q = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度, kg/m^3 ; c 为材料比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; Q 为单位体积热生成率, W/m^3 ; t 为时间, s ; k 为热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为温度, $^\circ\text{C}$ 。

应力应变演化满足非线性热弹塑性的应力应变关系^[17]。

$$\begin{Bmatrix} e \\ \varepsilon_{kl} \end{Bmatrix} = \{\varepsilon_{kl}\} - \{\varepsilon_{kl}^h\} - \{\varepsilon_{kl}^p\} \quad (2)$$

式中: e 为相对伸长量; ε_{kl} 为第 k 个面上第 l 个分量的应变; ε_{kl}^h 为热应变; ε_{kl}^p 为塑性应变。

随温度变化的热应变为

$$\varepsilon_{kl}^h = \alpha(T)(T - T_{\text{ref}}) \quad (3)$$

式中： α 为随温度变化的热膨胀系数； T_{ref} 为参考温度。

应力应变的强化机制为随动强化，力学模型采用双线性模型（bilinear model），如式（4）所示。

$$E_T = \frac{\sigma_{\text{lim}} - \sigma_y}{\varepsilon_{\text{lim}} - \varepsilon_y} \quad (4)$$

式中： E_T 为弹性模量，即材料在弹性变形范围内，作用于材料上的纵向应力与纵向应变的比例； σ_{lim} 为材料极限强度应力； σ_y 为材料屈服应力； ε_{lim} 为材料极限总应变； ε_y 为材料屈服时总应变。

1.2 基体材料与熔覆层材料参数设定

激光熔覆模拟过程属于瞬态热分析，材料的热物理性能参数，如比热容、热导率等随着温度的变化而变化，本文选用基体材料为H13钢，熔覆层材料为Ni60合金粉末。H13钢材料密度为7760 kg/m³、屈服强度为1400~1600 MPa、伸长率为8%~12%、断面收缩率为40%~50%^[18]、弹性模量为210 GPa、泊松比为0.3；Ni60合金材料密度为8900 kg/m³、屈服强度约345 MPa、伸长率为3%~8%、断面收缩率为5%~15%^[19]、弹性模量为180 GPa、泊松比为0.24。H13钢和Ni60热物理性能参数随温度变化情况^[20]分别见表1和表2。

表1 H13钢热物理性能参数

Tab. 1 Thermophysical properties parameters of H13 steel

温度 $T/^\circ\text{C}$	热传导系数 $k/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$	比热容 $c/(\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$	热膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$
25	24.3	460	11.0×10^{-6}
200	27.4	500	11.5×10^{-6}
400	30.5	540	12.1×10^{-6}
600	32.6	580	12.6×10^{-6}
800	33.8	620	13.2×10^{-6}

表2 Ni60合金热物理性能参数

Tab. 2 Thermophysical properties parameters of Ni60 alloy

温度 $T/^\circ\text{C}$	热传导系数 $k/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$	比热容 $c/(\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$	热膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$
20	14.5	460	12.0×10^{-6}
200	16.0	480	12.5×10^{-6}
400	18.0	500	13.0×10^{-6}
600	19.5	520	13.5×10^{-6}
800	20.5	540	14.2×10^{-6}
1000	22.0	560	15.0×10^{-6}

1.3 几何模型与网格划分

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，激光熔覆为对称模型，只需建

立对称模型的一半，基体模型尺寸为60 mm×25 mm×20 mm，熔覆层模型尺寸为60 mm×3 mm×1 mm（3层3道次），模型网格划分尺寸为0.001 mm，单元类型为solid70，该单元具有三向热传导能力，网格划分如图2所示。

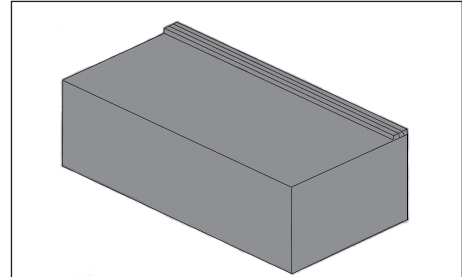


图1 有限元模型图

Fig. 1 Finite element model diagram

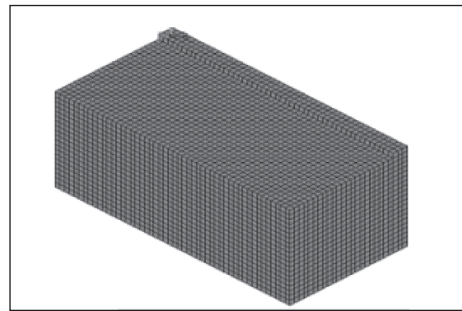


图2 模型网格划分

Fig. 2 Model mesh division

2 无织构温度场与应力场模拟仿真

2.1 正交实验设计

本文采用了正交实验法^[21-23]对激光熔覆参数进行优化设计。由于影响H13模具钢激光熔覆热力学性能的因素很多，模拟仿真过程中选择了3个比较敏感的因素^[24]，即激光功率 P 、扫描速率 v 和激光光斑半径 R 作为熔覆工艺参数。选取激光功率 P 为400、600、800 W；扫描速率 v 为5、10、20 mm/s；激光光斑半径 R 为0.4、0.6、0.8 mm设计正交实验，具体正交实验方案见表3。

2.2 激光熔覆模拟仿真

基于Ansys有限元仿真平台，模拟H13模具钢的激光熔覆过程，按照正交实验方案表，以激光功率、扫描速率、激光光斑半径为工艺参数，在基体不预热（温度22℃）环境下进行温度场仿真模拟。正交法设计的实验共计9组（3因素3水平），S1~S9的具体位置如图3所示。运用Ansys有限元仿真软件进行热-力耦合仿真模拟（Ansys经典界面，

结合 APDL 语言和 GUI 操作），获得熔覆层每道残余应力值和平均应力值，结果见表 4。

表 3 正交实验方案表
Tab. 3 Orthogonal experimental plan table

序号	激光功率 P/W	扫描速率 $v/(mm/s)$	激光光斑半径 R/mm
1	400	5	0.4
2		10	0.6
3		20	0.8
4	600	5	0.6
5		10	0.8
6		20	0.4
7	800	5	0.8
8		10	0.4
9		20	0.6

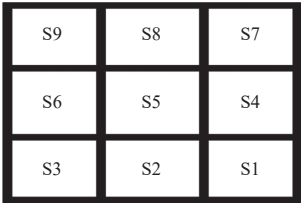


图 3 S1~S9 位置平面示意图
Fig. 3 S1-S9 position plan diagram

通过观察可以发现，第 3 组平均应力值最小，为 678.52 MPa。观察图 4 所示的第 3 组熔覆总体温度图，其温度最大值为 1 161.11℃，未达到熔点 1 300℃。因此，除第 3 组之外，满足熔点条件且平均残余应力值最小的是第 2 组，平均残余应力值为 725.12 MPa。

2.3 参数优化——均值分析

对上述仿真结果的熔覆工艺参数进行优化，进而利用优化后的参数进行无织构、有织构仿真以及

实际熔覆加工。利用 Minitab 软件对正交实验结果进行均值响应分析，均值响应见表 5，其中 A、B、C 分别代表激光功率、扫描速率和激光光斑半径。

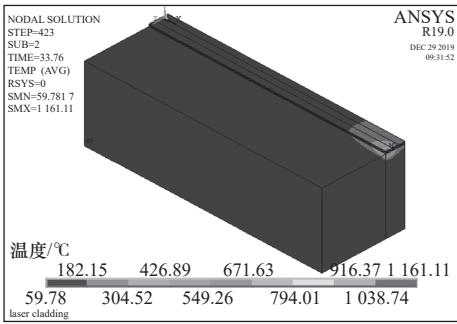


图 4 第 3 组总体温度图
Fig. 4 Overall temperature chart of group No.3

根据表 5 所示结果，可得出最优参数分别为 A1、B3 和 C3，即选取激光功率 $P=400\text{ W}$ 、扫描速率 $v=20\text{ mm/s}$ 、激光光斑半径 $R=0.8\text{ mm}$ 为最优参数，对比 Delta 值大小，可得到 3 个实验因素的影响等级，即激光功率>激光光斑半径>扫描速率。

3 最优参数下无织构热-力模拟仿真

选取优化参数激光功率 $P=400\text{ W}$ 、扫描速率 $v=20\text{ mm/s}$ 、激光光斑半径 $R=0.8\text{ mm}$ 进行无织构热-力模拟仿真实验。图 5 所示为激光熔覆过程中的温度分布，最高温度为 1 813.92℃；总应力分布如图 6 所示，最优参数下无织构激光熔覆层平均应力值见表 6。

分析表 6 数据可知，优化参数后无织构激光熔覆热-力模拟仿真熔覆层平均应力值 $\sum N=704.34\text{ MPa}$ ，较前文正交实验中最优应力 725.12 MPa 有所减小。

表 4 无织构仿真熔覆层应力值表

Tab. 4 Stress value table of texture free simulation cladding layer MPa

序号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	平均应力值
1	705.73	531.54	1 013.20	1 529.74	1 395.26	1 279.14	685.25	1 515.07	1 107.13	1 084.67
2	683.22	535.47	634.42	786.96	868.49	896.12	619.29	924.17	577.93	725.12
3	662.72	619.77	651.06	787.18	773.78	708.05	577.10	706.43	620.62	678.52
4	855.55	515.58	1 015.10	1 529.96	1 497.61	1 234.61	858.84	1 791.30	1 293.59	1 176.90
5	600.82	545.74	594.15	722.98	970.34	795.13	635.53	1 092.81	604.68	729.13
6	997.90	729.04	1 054.76	1 590.19	1 696.38	1 774.66	904.47	1 722.20	810.04	1 253.29
7	759.15	637.84	1 015.41	1 565.34	1 750.08	1 140.55	886.33	2 072.82	1 453.12	1 253.40
8	1 141.07	785.35	1 693.36	2 665.25	2 536.08	2 438.95	1 182.50	2 737.05	1 881.47	1 895.68
9	971.41	711.81	928.34	1 268.76	1 475.39	1 450.34	1 042.89	1 618.91	959.94	1 158.64

表 5 均值响应表
Tab. 5 Mean response table

水平	A	B	C
1	829.4	1 171.7	1 411.2
2	1 053.1	1 116.6	1 020.2
3	1 435.9	1 030.2	887.0
对冲值	606.5	141.5	524.2
等级	1	3	2

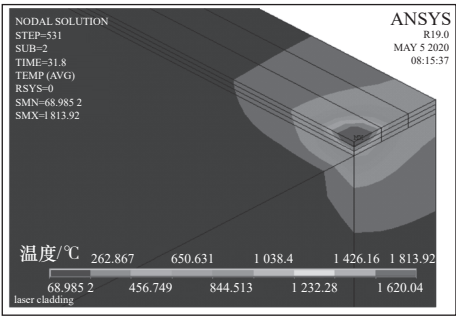


图 5 最优参数下无织构仿真温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution diagram without texture simulation under optimal parameters

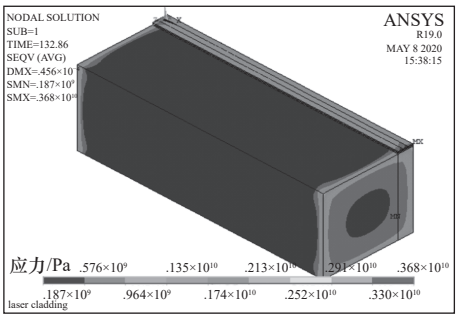


图 6 最优参数下无织构仿真应力分布图

Fig. 6 Stress distribution diagram without texture simulation under optimal parameters

表 6 最优参数下无织构激光熔覆层平均应力值表

Tab. 6 Average stress values of untextured laser cladding layer under optimal parameters			
MPa		MPa	
位置	平均应力值	位置	平均应力值
S1	564.96	S6	585.74
S2	590.29	S7	682.83
S3	706.53	S8	904.51
S4	875.21	S9	641.51
S5	787.44	熔覆层平均应力值	704.34

4 最优参数下有织构热-力模拟仿真

4.1 织构预置

在 H13 模具钢待熔覆表面预置表面织构，共 30 个，按 3×10 排列，间距 6.45 mm。预置织构为

0.3 mm×0.3 mm×0.2 mm 正方形凹坑，其中织构深度为 0.2 mm。基体预置表面织构如图 7 所示。

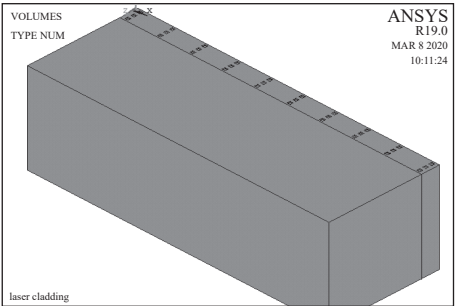


图 7 基体预置表面织构图

Fig. 7 Prearranged surface texture map of the substrate

4.2 仿真结果

基体表面预置织构后，在最优化参数条件下进行有织构热-力模拟仿真。激光熔覆过程中的温度分布如图 8 所示，最高温度为 2 031.48 ℃；熔覆后熔覆层平均应力值见表 7。

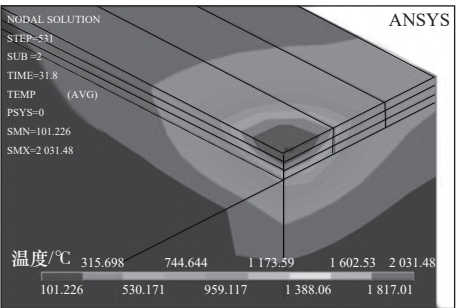


图 8 最优参数下有织构仿真温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution map with texture simulation under optimal parameters

表 7 最优参数下有织构仿真熔覆层平均应力值表

Tab. 7 Average stress values of texture simulation cladding layer under optimal parameters

MPa			
位置	平均应力值	位置	平均应力值
S1	620.67	S6	586.71
S2	535.25	S7	369.59
S3	573.93	S8	528.88
S4	526.43	S9	365.01
S5	589.62	熔覆层平均应力值	521.48

将最优参数下无织构与预置织构的仿真结果进行对比，在 H13 模具钢激光熔覆热-力耦合模拟过程中，通过在基体表面预置表面织构再进行熔覆的工艺方法，熔覆层温度变化不大，但熔覆后熔覆层的残余应力显著降低，其熔覆层平均应力值 $\sum N=521.48$ MPa，相对于无织构熔覆层平均应力值

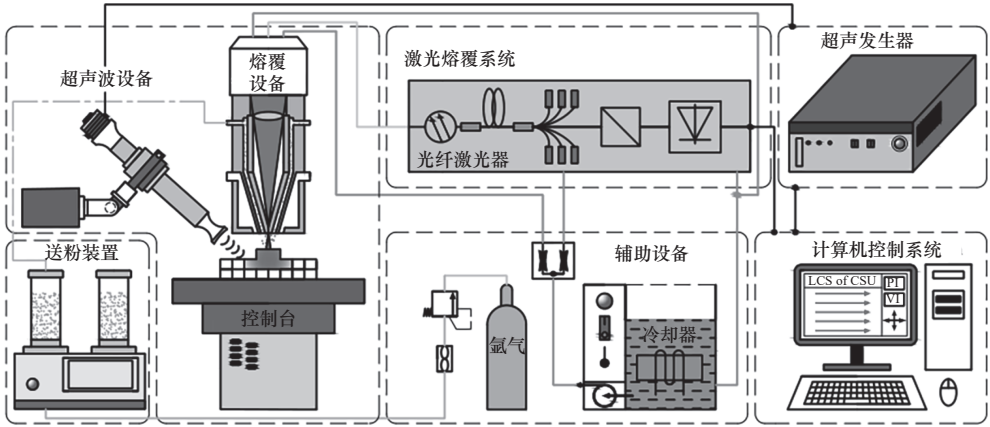


图 9 激光熔覆装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of laser cladding device

$\sum N = 704.34 \text{ MPa}$ ，降低了 25.96%，可以有效减少熔覆层裂纹的出现，延长模具的再制造使用寿命。

5 实验研究测定残余应力

使用图 9 所示的激光熔覆装置，在 H13 模具钢基体上进行激光熔覆实验，熔覆粉末为 Ni60 合金粉末，实验参数与数值模拟参数一致，采用最优参数，激光功率 $P=400 \text{ W}$ 、扫描速率 $v=20 \text{ mm/s}$ 、激光光斑半径 $R=0.8 \text{ mm}$ 。熔覆过程采用对照实验法，即对 H13 模具钢有无表面织构进行对照实验。采用图 10 所示的残余应力分析仪（X-RAYS）设备对熔覆后工件进行残余应力测定。

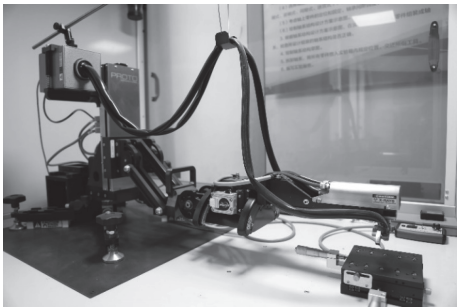


图 10 残余应力分析仪装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of residual stress analyzer device

在测量残余应力前，使用饱和的 NH_4Cl 溶液对熔覆后的工件逐层剥离，电解抛光，最终测定残余应力的平均值，两份工件的测量结果如图 11、图 12 所示。Det1 为最大上限，Det2 为下限，代表残余应力测量时的偏差，二者之间的面积越小，代表误差越小；图 11 和图 12 的横坐标为 $\text{Phi}[1]=0.00$ ，其含义为测试方向的衍射界面与法线夹角，单位为 $^\circ$ ；纵坐标为 D-Spacing EM，其含义为测试晶面间距，单位为 μm 。

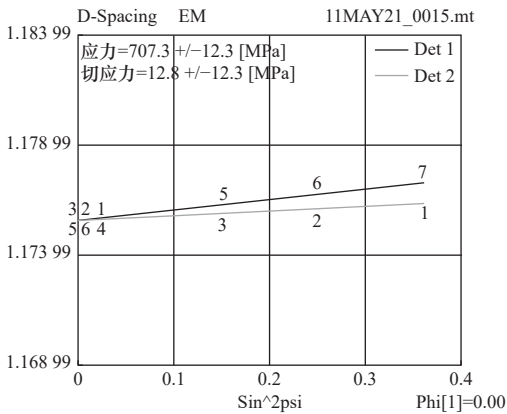


图 11 最优参数下无织构的残余应力测定图

Fig. 11 Measurement of residual stress without texture under optimal parameters

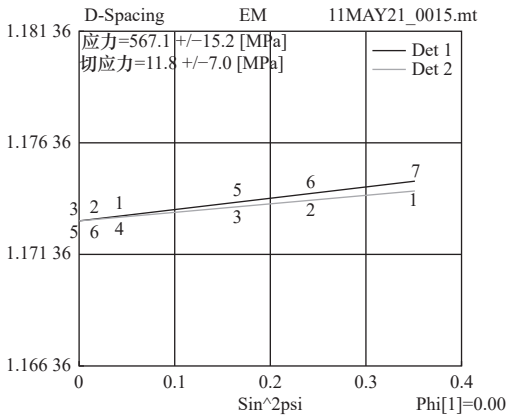


图 12 最优参数下有织构的残余应力测定图

Fig. 12 Determination of residual stress with texture under optimal parameters

无织构的平均应力值为 707.3 MPa ，有织构的平均应力值为 567.1 MPa ，相较之下，有织构的应力值较无织构降低了 18.55%。激光熔覆过程中熔池状态下产生的主要应力为压应力，凝固过程产生的

主要应力为拉应力,故预留表面织构能够有效地降低熔覆层的残余应力,减少工件表面的裂纹的产生。

实验结果与仿真结果的残余应力分布趋势一致,验证了仿真结果的准确性。但同时实验结果与仿真结果之间存在一定的差异性,主要有以下几个方面:仿真实验模型的简化,有限元网格划分程度有限;忽略了一些环境因素的影响;现实中预留表面织构与仿真织构存在细小差异。

6 结语

(1) 设计3因素3水平正交实验,利用均值分析法求得激光熔覆最优参数为:激光功率 $P=400\text{ W}$ 、扫描速率 $v=20\text{ mm/s}$ 、激光光斑半径 $R=0.8\text{ mm}$;在影响熔覆层残余应力的因素中,其影响程度从高到低的排列顺序依次为激光功率>激光光斑半径>扫描速率。

(2) 在最优熔覆参数条件下,对H13模具钢进行激光熔覆热-力耦合模拟,预置织构熔覆后熔覆层的最高温度为 $2\,031.48\text{ }^{\circ}\text{C}$,较无织构熔覆后熔覆层的最高温度 $1\,813.92\text{ }^{\circ}\text{C}$,略有升高。

(3) 通过在基体表面预置织构的处理方法,可以熔覆后熔覆层的残余应力显著降低,其熔覆层平均应力值 $\sum N = 521.48\text{ MPa}$,相对于无织构熔覆层平均应力值 $\sum N = 704.34\text{ MPa}$,残余应力在数值上降低了 25.96% ,可以有效地减少熔覆层裂纹的出现,提高模具的再制造使用寿命,是一种有效的模具激光熔覆再制造工艺方法。

参 考 文 献

- [1] LAY Y, ROJ R, BONNET M, et al. Design and validation of additively manufactured injection molds[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2023, 10(2): 226-235.
- [2] BRAGE V, SIQUEIRA R H M, ATILIO I, et al. Microstructural and mechanical aspects of laser metal deposited H13 powder for die repair[J]. Materials Today Communications, 2021, 29: 102945.
- [3] CHO S Y, SHIN G Y, SHIM D S. Effect of laser remelting on the surface characteristics of 316L stainless steel fabricated via directed energy deposition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 155: 814-832.
- [4] BAI Y Y, XI Y T, GAO K W, et al. Brittle coating effects on fatigue cracks behavior in Ti alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125: 432-439.
- [5] KUO T Y, CHIN W H, CHIEN C S, et al. Mechanical and biological properties of graded porous tantalum coatings deposited on titanium alloy implants by vacuum plasma spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 372: 399-409.
- [6] LI M Y, HAN B, SONG L X, et al. Enhanced surface layers by laser cladding and ion sulfurization processing towards improved wear-resistance and self-lubrication performances[J]. Applied Surface Science, 2020, 503: 144226-144226.
- [7] SONG M K, KIM J D, Lee M Y. Improvement of surface characteristics of mold steel using laser cladding and shock peening[J]. Modern Physics Letters B, 2022, 36(18): 2242037.
- [8] HU B, HAN J H, WANG J H. Parameter study and economic efficiency optimization for laser cladding with wide-band fiber laser[J]. International Journal of Optics, 2022, 2022: 6373772.
- [9] TABERNEIRO I, CALLEJA A, LANIKIZ A, et al. A methodology for process parameter selection in five axis laser cladding[J]. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 2014, 7(2/3): 82-92.
- [10] XIANG D D, LIU Y S, YU T B, et al. Review on wear resistance of laser cladding high-entropy alloy coatings[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 289: 11-934.
- [11] LIANG H, LIU J H, SUN L K, et al. Optimization of the forming quality of a laser-cladded AlCrFeNiW 0.2high-entropy alloy coating[J]. Coatings, 2023, 13(10): 1744.
- [12] MA P Z, WU Y, ZHANG P J, et al. Solidification prediction of laser cladding 316L by the finite element simulation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1-4): 957-969.
- [13] KATTIRE P, PAUL S, SINGH R, et al. Experimental characterization of laser cladding of CPM9V on H13 tool steel for die repair applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20: 492-499.
- [14] JAVID Y, GHOREISHI M. Thermo-mechanical analysis in pulsed laser cladding of WC powder on Inconel 718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 69-79.
- [15] 舒林森, 王家胜. 铣刀盘激光熔覆修复过程的温度场与应力场有限元仿真[J]. 中国机械工程, 2019, 30(1): 79-84.
- [16] YE R Q, SMUGERESKY J E, ZHENG B L, et al. Numerical modeling of the thermal behavior during the LENS® process[J]. Materials Science & Engineering A, 2006, 428(1/2): 47-53.
- [17] 贾文鹏, 林鑫, 陈静, 等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2007(9): 1308-1312.
- [18] ZENG Z Z, LIN D, SHANG J. Improvement of wear and hot melt loss resistance of metal carbide layers on H13 steel[J]. Materials Research Express, 2024, 11(2): 026502.
- [19] QUN C, GANG L, BIAO W, et al. Effect of TiC content on microstructure and properties of TiC/Ni60 coatings on Ti6Al4V alloy deposited by laser cladding[J]. Optics and Laser Technology, 2024, 168: 109854.
- [20] 陈稳, 王华君, 谢冰, 等. 退火温度对H13钢等离子堆焊Ni60/WC覆层组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(2): 131-136.
- [21] 刘笃喜, 覃秋霞, 王新刚, 等. 基于正交实验的大气静压精密测量静压管设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 360-367.
- [22] 吴石林, 张玘, 黄芝平. 基于正交实验的Spherical-cymbal换能器谐振频率优化[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(3): 682-688.
- [23] 张勇, 邱静, 刘冠军, 等. 正交实验下基于FMMESA和GRA的环境应力-故障关联分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 29-35.
- [24] 徐合兵. 机织碳纤维复合材料短脉冲激光铣削的实验研究与数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.

第一作者/通信作者: 赵昌龙, 男, 1979年生, 博士, 教授, 研究方向为激光熔覆、数控加工。E-mail: zhao19790204@126.com

(编辑 李 静)

(收稿日期: 2024-06-13)

