

引用格式:李卫民,杨泽宇,付松松,等.马氏体时效钢激光熔覆增材制造的温度场模拟与试验研究[J].热加工工艺,2025,54(9):130-136

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20230366

<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

马氏体时效钢激光熔覆增材制造的温度场模拟与试验研究

李卫民, 杨泽宇, 付松松, 刁家宇

(辽宁工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要:为探究马氏体时效钢的激光熔覆增材制造性能,选择了18Ni300同种粉末与基材进行仿真分析,研究了不同工艺参数对增材制造过程温度场的影响,进行了试验验证与分析。结果表明:在不同工艺参数下的最大温度曲线趋势相同,为急剧升高,在某一时间保持稳定,激光功率影响更显著;熔覆层随激光移动成型,其前端在激光未达到时有成型趋势,相对于末端温度梯度更大,熔池形状为勺形。扫描方向的温度由慢到快依次达到峰值,且后到达的点的温度大于前点;竖直方向的温度在同一时间全部达到峰值,功率越大,温度梯度越大。仿真与试验得到的熔覆层截面形貌基本一致,结合凝固参数对熔覆层截面气孔形成原因分析,获得了最优试验参数。节省了试验时间和成本,对试验的分析与结果选择有着指导作用。

关键词:马氏体时效钢;激光熔覆;有限元仿真;显微组织

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)09-0130-07

Temperature Field Simulation and Experimental Studies of Maraging Steel by Laser Cladding Additive Manufacturing

LI Weimin, YANG Zeyu, FU Songsong, DIAO Jiayu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: In order to investigate the manufacturing performance of maraging steel by laser cladding, 18Ni300 powders and substrate were selected for simulation analysis, and the influence of different process parameters on the temperature field during the manufacturing process were studied, the experimental results were verified and analyzed. The results show that the maximum temperature curves have the same trend under each process parameter, and the influence of laser power is more significant for the rapid increase and the stability at a certain time. The cladding layer is formed with the laser movement, and the front end is formed when the laser is not reached. Compared with the terminal, the front end has larger temperature gradient, and the shape of the melting pool is spoon-shaped. The temperature in the scanning direction reaches the peak from slow to fast, and the temperature at the later point is greater than the previous point. The temperatures in the vertical direction all reach the peak at the same time. The greater the power, the greater the temperature gradient. The simulation results are in good agreement with the experimental results. Based on the analysis of the formation causes of solidification parameters, the optimal test parameter is obtained. It saves the test time and cost, and has a guiding role in the analysis and selection of the test results.

Key words: maraging steel; laser cladding; finite element simulation; microstructure

18Ni300 是马氏体时效钢中具有高强度的新型钢材,主要被应用于多种高端技术领域^[1-2],经固溶、时效处理可明显改善其强度和硬度。激光增材制造

是一种采用激光为能量源,同时满足精密成型与高性能成型要求的智能制造技术^[3],该技术在许多领域得到广泛应用^[4]。激光功率、扫描速度等诸多因素对激光增材制造的质量有着不同的影响^[5],优化工艺参数是控制成形质量最有效的途径。通过对制造过程建立有限元模型与仿真,可以进一步降低试验工作量,提高试验效率,为理论研究打下基础^[6]。

近几年,在激光熔覆增材制造的研究中,大量学者采用数值仿真与试验验证相结合的方法,为未来

收稿日期:2023-02-21 修回日期:2024-03-14

基金项目:辽宁省“揭榜挂帅”科技重点专项项目(2022JH1/10800022)

作者简介:李卫民(1965-),男,辽宁朝阳人,教授,博士,主要研究方向:

机械 CAD/CAE/CAM/ERP、数字化设计与制造;

E-mail:liwmqh@163.com

发展提供了一种有效的途径^[7]。段伟等^[8]对 TC4 材料进行了多种试验参数的温度、应力有限元模拟,并从成形质量和时间上进行了优化。袁景光等^[9]采用高斯面热源模拟了铜-锡合金选区激光熔化成形过程的温度场,模拟与试验结果变化趋势基本一致。Yi 等^[10]通过等离子转移电弧焊技术制造了具有 WC 添加剂的 18Ni300 熔覆层,得到了更优性能的涂层。以上研究表明,在各个材料的研究中,激光熔覆数值模拟已得到了较好的应用,查阅资料还未发现对 18Ni300 同种粉末基材的激光熔覆数值模拟进行研究。因此本文采用数值模拟和试验结合的方式探究熔覆工艺参数对温度场与熔覆形状的影响,进行试验验证与结果分析,可为研究马氏体时效钢增材制造研究提供参考与指导。

1 有限元模型设定

1.1 材料热物性参数设置

本次试验采用 18Ni300 球形粉末,粒度为 45~

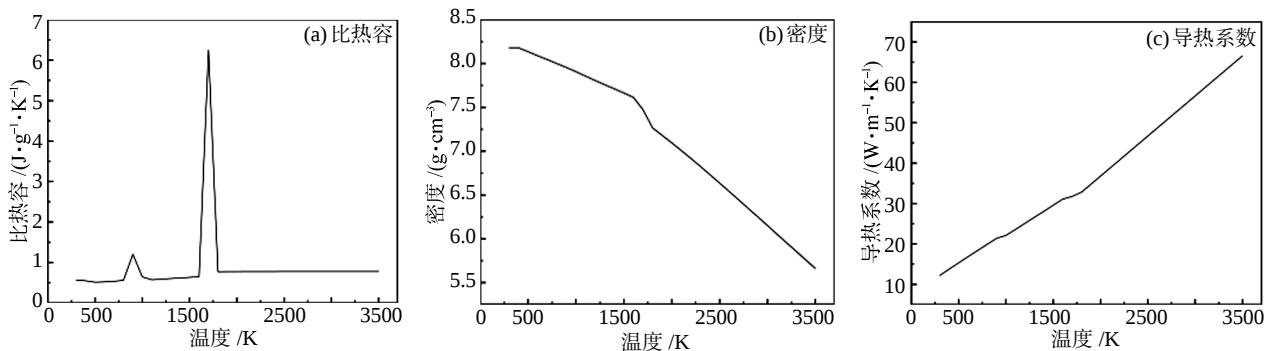


图 1 18Ni300 的热物性参数
Fig.1 Thermophysical parameters of 18Ni300

1.2 有限元模型建立

使用 COMSOL 软件进行有限元模拟,设置基体尺寸为 15 mm×5 mm×2.5 mm,为了提高仿真效率,在不影响结果的前提下对仿真模型进行简化。图 2 为有限元模型网格划分及高斯热源模型。激光始

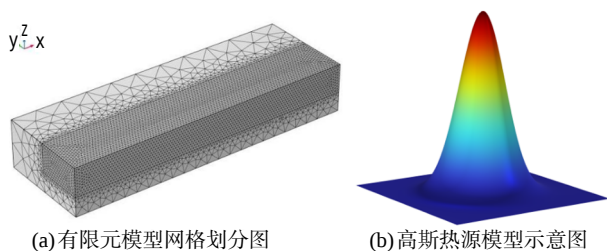


图 2 有限元模型网格划分及高斯热源模型
Fig.2 Grid division of finite element model and Gaussian heat source model

105 μm, 18Ni300 粉末的化学成分见表 1。基板选用 18Ni300 钢材,化学成分见表 2。通过表 1、2 可看到粉末成分和基材成分十分相似。

表 1 18Ni300 粉末的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of the 18Ni300 powders (wt%)

Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	P	Mn	Si	C	S	Fe
18.3	8.9	4.7	0.7	0.2	0.1	0.05	0.02	0.03	0.05	0.03	余量

表 2 18Ni300 基材的化学成分(质量分数,%)
Tab.2 Chemical composition of the 18Ni300 substrate (wt%)

Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	P	Mn	Si	C	S	Fe
18.0	8.6	4.6	0.8	0.4	0.35	0.10	0.10	0.10	0.03	0.05	余量

由于仿真软件材料库中未定义此材料,因此采用 JmatPro 软件根据上述材料组成成分模拟出材料不同温度下热物性参数,18Ni300 的热物性参数如图 1 所示。

终作用于工件的表面中部,采取对称模型进行仿真;考虑到瞬态求解过程中熔覆层位置网格质量要求较高,先对激光作用位置进行细化,再对其余基体位置进行网格划分,如图 2(a)所示。本次研究仿真中采用高斯热源模型模拟激光,热源分布如图 2 (b)所示,热源密度见公式(1):

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) = q_m \cdot \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

式中: q_m 为高斯热源密度最大值; Q 为激光能量的输入; r 为任意点距激光光斑中心的距离; R 为激光光斑半径。

为了能接近增材制造实际情况,本文采用动网格与固体传热配合的方法来进行有限元模拟,结合文

献[11]的边界条件进行设置,有限元模拟参数见表3。

表3 有限元模拟参数
Tab.3 Finite element simulation parameters

试样编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]
激光功率/W	1100	1300	1500	1100	1300	1500	1100	1300	1500
扫描速度/(mm·s ⁻¹)	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5

由于中心截面所获得的数据稳定性和准确性较高,为方便对温度的探究,在中心截面添加温度探针。温度探针的位置与编号如图3所示。由图可见,1、2、3、4点在中心截面,每个节点间距为0.5mm;5、6、7点与3点在一竖直线上,间距为0.25mm。

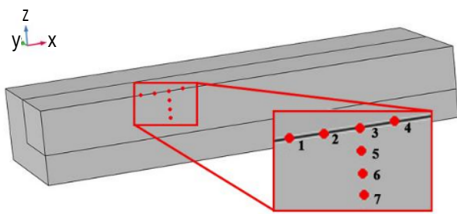


图3 温度探针的位置与编号
Fig.3 Position and number of temperature probes

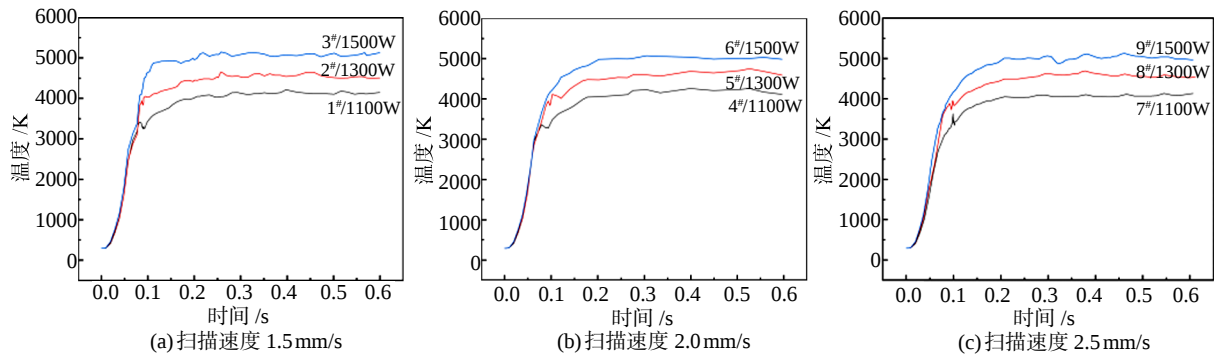


图4 不同时间下试样的最大温度曲线

Fig.4 Maximum temperature curves of the samples under different time

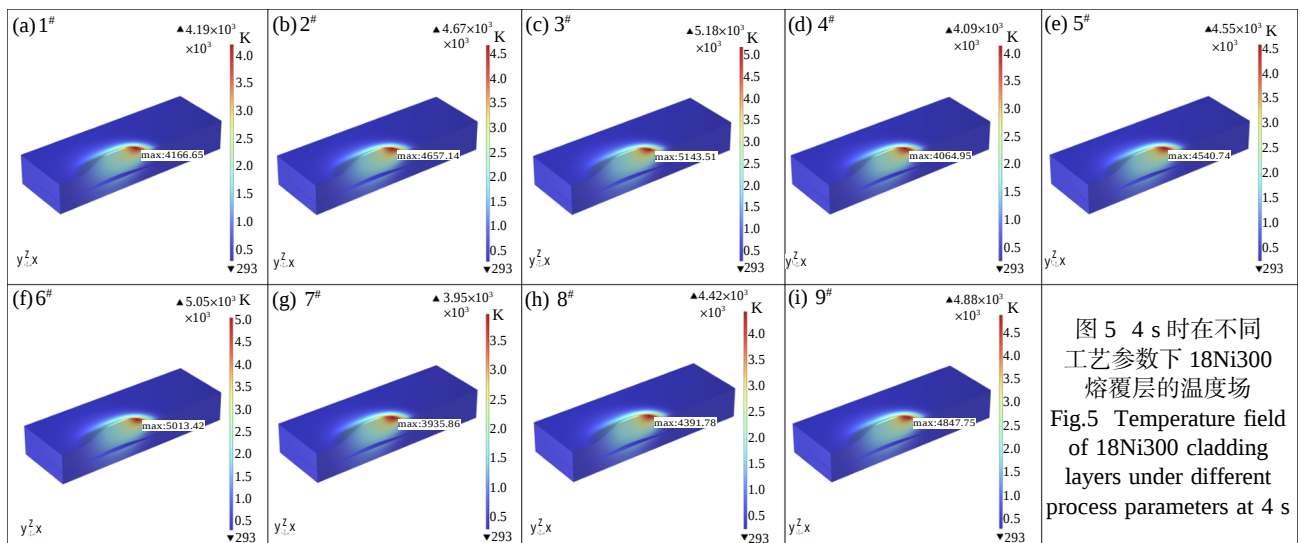


图5 4 s时在不同工艺参数下18Ni300熔覆层的温度场
Fig.5 Temperature field of 18Ni300 cladding layers under different process parameters at 4 s

2 有限元仿真结果分析

2.1 工艺参数对最大温度分布的影响

根据表3的工艺参数进行仿真试验,图4为不同时间下试样的最大温度曲线。由图可知,试样温度随着时间增加逐渐升高,时间为0.2s时达到温度最高点并趋于稳定,最大温度与文献[12]相似;功率参数为1500W时仿真中获得的最大温度要比其他功率高得多。是因为在同一位置上,当激光功率增加时,所得到的能量会提高;而扫描速度的影响则与此相反,因为单位体积上工作时间越长,熔覆温度越高。

图5为4s时在不同工艺参数下18Ni300熔覆层的温度场,对最大温度的位置进行了标记。从图中可得,不同工艺参数下的温度分布相似,熔覆层随着激光前移成型,其前端在激光未达到时有成型趋势,是因为随着激光移动能量快速积累,熔池前端温度梯度大于尾部,从而达到成型条件,形成了勺形熔池。激光直接作用区域的温度梯度较大,可能会对熔覆层形貌造成影响,最大温度超出了材料

的沸点,易导致熔覆层中产生孔洞等缺陷^[13]。图5(c)中最大温度达到了5143.51 K,相比于图5(a)中最大温度提高23.45%,进一步证明激光功率对温度影响更大。

2.2 工艺参数对基体各点温度分布的影响

根据上述分析可得激光功率对温度场的分布影响较大,为进一步探究其对温度的影响,采用扫描速度为2 mm/s,激光功率分别为1100、1300、1500 W的参数(分别对应表3中的4[#]、5[#]、6[#]试样)对各节点的温度进行探究,1、2、3、4点在整个熔覆过程温度曲线如图6所示。当功率升高各点的温度也随之升高,温度曲线更加密集;各点温度曲线变化趋势相同,可分为从室温升高到峰值和峰值下降至基体温度两个阶段。激光照射的瞬间,相对位置的温度迅速升高,在曲线上呈现出了1个高峰,此时达到了最大温度,随后在热交换和热传导的作用下,温度迅速降

到1500 K左右。由于热传导和激光束在移动过程中使得能量逐渐累积,1、2、3、4点的温度依次达到峰值,且后到达的点的温度大于前点。

图7为采用扫描速度为2 mm/s,激光功率分别为1100、1300、1500 W(分别对应表3中的4[#]、5[#]、6[#]试样)的3、5、6、7点不同时间温度曲线图。这4个点同时达到最高温度,功率越大温度梯度越大,可推测在极短时间内经历复杂的形态变化,温度迅速上升到极值,然后迅速冷却,导致晶粒析出的速度加快。3点的温度梯度最大,可推断出熔覆层顶端晶粒将更密集,晶粒尺寸更小;3、5、6点的温度最高值比基体和金属粉末的熔点要大,处于可熔化状态,7点的温度最高值未达熔点,所以,6点和7点之间为熔化界限。相比图6,竖直方向温度梯度比扫描方向温度梯度大,推测在熔覆层底部和基体间组织沿竖直方向优先生长^[14]。

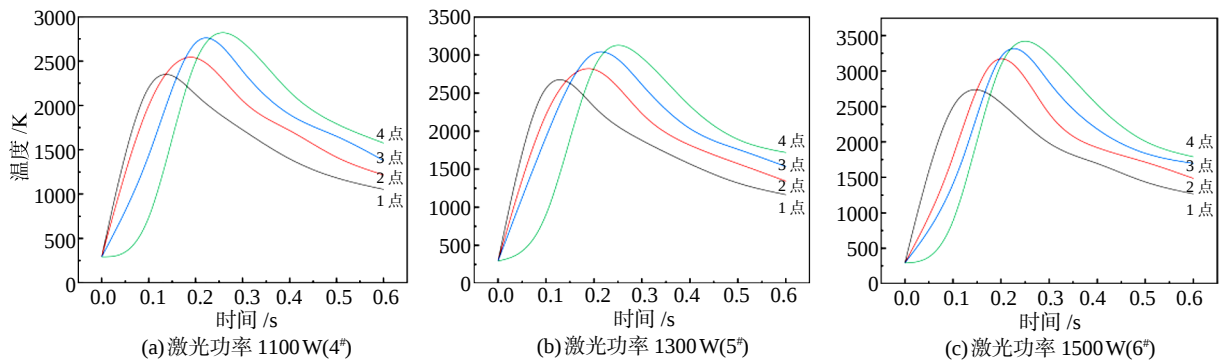


图6 不同时间扫描方向的节点温度曲线

Fig.6 Temperature curves of nodes in different scanning direction at different time

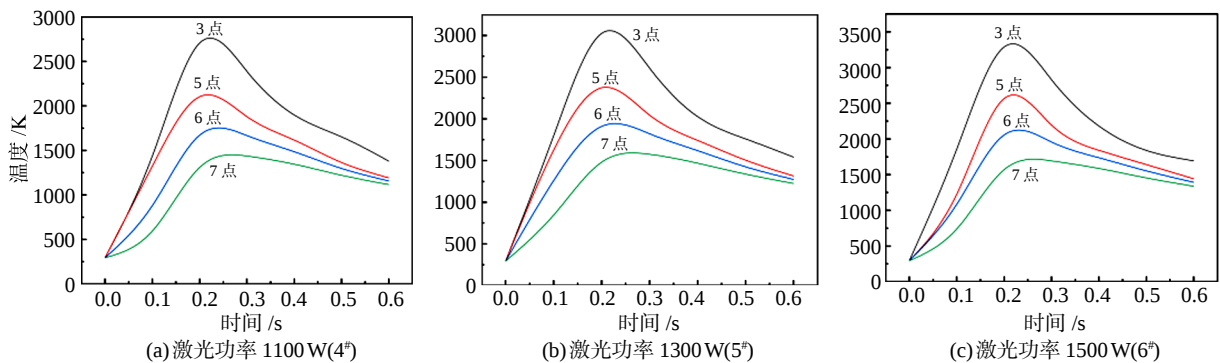


图7 不同时间垂直方向节点温度曲线

Fig.7 Temperature curves of nodes in different vertical direction at different time

3 试验验证与讨论

3.1 宏观形貌与熔池对比

本次试验仪器有YLR-3000激光器、KUKA机械手、FHPF-10同步送粉器等。进行试验前对基材进行清洁,防止表面的杂质元素及氧化层对试验造成

影响,同时对粉末进行烘干除潮。将进行完试验的18Ni300基材利用线切割技术切成方便抛磨的样品形状,用600~2000目的砂纸对切割后的熔覆层进行多次打磨,用金相磨抛试验仪进行抛光,采用体积比为4vol%的硝酸酒精溶液对抛光后的熔覆层表面腐蚀,最后用工业酒精清洁其表面并进行烘干。为了

方便进行对比,采用扫描速度 2 mm/s,激光功率分别为 1100、1300、1500 W(分别对应表 3 中的 4#、5#、6# 试样)进行激光熔覆增材制造试验。图 8 为试样的宏观形貌。从图 8 可以看出,在此工艺参数下,熔覆层形貌饱满具有金属光泽,表面仅有少量未熔化的粉体颗粒与球化颗粒,总体成型质量良好,试验效果较好。

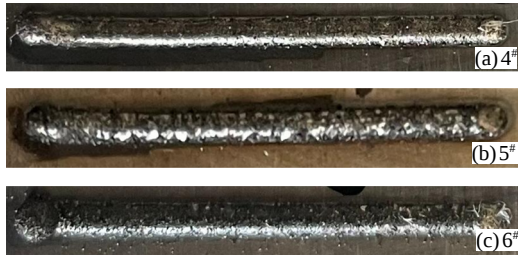


图 8 试样的宏观形貌
Fig.8 Macroscopic morphologies of the specimens

图 9 为熔覆层的截面形貌。如图 9(a)所示,将本文完成的数值仿真模型与试验熔池截面进行对照,试验与仿真的熔池截面形貌尺寸相近,对两者熔池深度进行测量仿真计算熔化深度为 0~0.2 mm,试验测得深度为 0.074 mm,试验与仿真结果偏差很小,确保了仿真模拟的可靠性。从图 9(b)、(c)中发现熔覆层的截面中存在较大圆形气孔,且在结合位置均有气孔出现。当功率为 1500 W 时截面出现了大量的大孔洞,严重影响了熔覆的质量,降低了熔覆层的耐蚀性能^[15]。

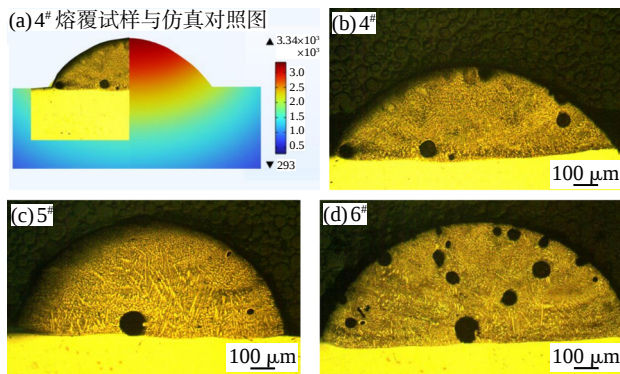


图 9 熔覆层的截面形貌
Fig.9 Section morphologies of the cladding layers

3.2 熔覆截面气孔分析

对图 9 中的熔覆层截面形貌气孔进行分析,熔覆层截面的孔隙率与气孔个数如图 10 所示。可以看出,气孔个数与孔隙率的变化趋势相同呈凹状,在激光功率为 1500 W 时(6# 试样)气孔个数与孔隙率达到最大。因为此时温度梯度较大,在反冲压力和表面

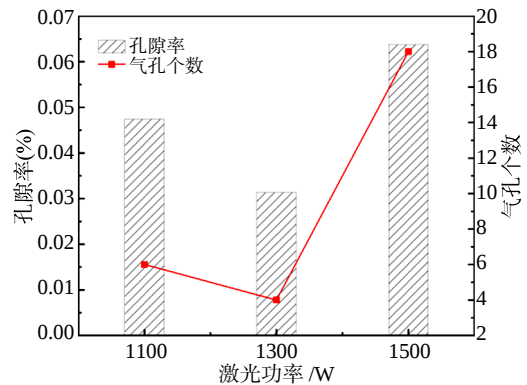


图 10 熔覆层截面的孔隙率与气孔个数
Fig.10 Porosity and number of porosity of cladding layer section

张力的影响下,熔融和固化过程非常复杂、迅速且不稳定,由于试验过程中保护气体的干扰使得熔池内的气体在完全凝结之前不能排出,从而导致了熔覆层出现孔洞缺陷。当功率为 1300 W(5# 试样)时气孔个数与孔隙率均最优。

结合凝固理论进一步探究对气孔的影响,从不同工艺参数仿真实验中获取扫描速度 2 mm/s,激光功率分别为 1100、1300、1500 W 参数下(4#、5#、6# 试样)时间为 0.6 s 时凝固参数的温度梯度(G)和生长速度(S),如图 11 所示。从图中可以看出,温度梯度和生长速度随着激光功率的增大而增加,均为递增趋势,但在功率为 1300 W(4# 试样)时温度梯度的增长率大于生长速度的增长率,与功率为 1100、1500 W(4#、6# 试样)的增长趋势恰巧相反,此时增长率的变化可能是导致功率 1300 W 下(5# 试样)熔覆层形貌较好的原因之一,熔覆层在凝固前未进入太多气体而降低了孔隙率,减少了气孔个数,试验情况与仿真获得的温度场结果相符合。

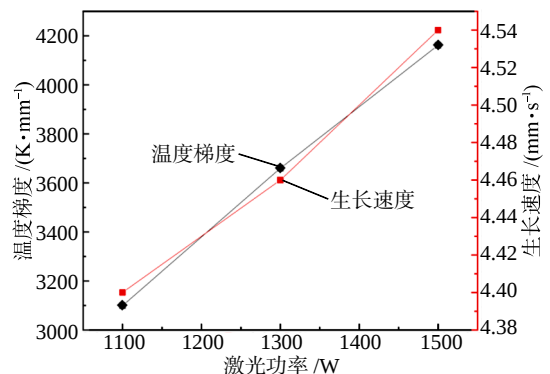


图 11 0.6 s 时的凝固参数
Fig.11 Solidification parameter at 0.6 s

3.3 微观形貌与物象组成

图 12 为本次试验熔覆层形貌情况较好的在激

光功率为 1300 W, 扫描速度为 2 mm/s 参数下熔覆层(5[#] 试样)不同位置的显微形貌图。由于熔覆层各个部分的温度分布及散热性不均匀, 组织形态有着明显差异^[16]。图 12(a)为熔覆层顶部金相组织, 由细小的胞状晶和等轴晶组成, 因为试验中熔覆层顶部与空气接触, 冷却速度快, 导致了晶胞的聚集, 限制了生长。在图 12(b)中观察熔覆层中部出现等轴晶、胞状晶和柱状树枝晶的混合组织, 因为熔池的冷却速度大, 在熔池中发生动态的非平衡结晶, 熔合线上端细小的晶胞来不及长大就已经结晶, 形成细小等轴晶、胞状晶; 在熔合线下端沿着最大冷却速度的相

反方向生长形成相对粗大柱状树枝晶, 但往往由于温度分布不均匀以及热扩散等原因, 造成部分柱状树枝晶出现偏向生长甚至停止生长的情况。在图 12(c)中观察熔覆层底部出现垂直于熔合线生长的柱状树枝晶并混有胞状晶, 由于液体金属在凝固过程中, 垂直方向上存在较大温度梯度, 晶核在此晶向上迅速生长; 在熔覆层和基体交界处有一条较明显的曲线, 为熔覆层和基体的边界, 说明熔覆层与基体间有着良好的冶金效果。本次试验组织生长方向和形状与数值仿真结果基本吻合, 且整体组织细密, 没有明显的缺陷。

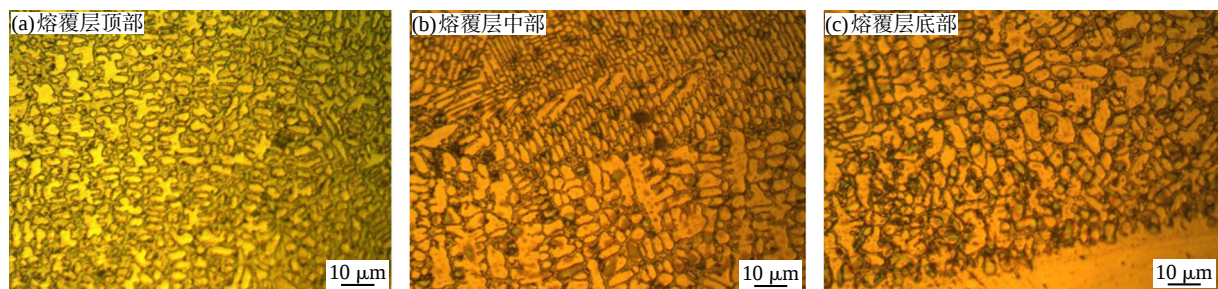


图 12 熔覆层不同位置的显微组织(5[#] 试样)

Fig.12 Microstructure of cladding layer at different locations (5[#] sample)

图 13 为本次试验熔覆层形貌情况较好的在激光功率 1300 W, 扫描速度 2 mm/s 参数下熔覆层(5[#] 试样)的 XRD 衍射图谱。设扫描范围为 30°~90°, 步宽角度为 8°。在衍射角约为 44°、51°和 75°出现结晶峰, 与 PDF 标准卡片数据库中 PDF#01-077-7452 的 PDF 标准卡片无论在晶面间距, 结晶峰衍射角和衍射强度都基本吻合, 该 PDF 标准卡片指向的物相为 Co, 通过查看晶体结构得知, 该物相晶体为面心立方晶系基元, 对应的晶面指数为(111)、(200)和(220)。在衍射角约为 45°、65°和 83°处出现的结晶峰, 与 PDF 标准卡片数据库中 PDF#04-003-3330 和 PDF#03-065-

7251 的 PDF 标准卡片在晶面间距, 结晶峰衍射角和衍射强度都基本吻合, PDF 标准卡片指向的物相为 Fe 和 Fe₇Ni₃, 通过查看晶体结构得知, Fe 晶体为立方晶系基元, 是 α-Fe, Fe₇Ni₃ 晶体为面心立方基元, α-Fe 和 Fe₇Ni₃ 对应的晶面指数为(110)、(200)和(211), 根据材料 Fe 和 Ni 的成分比例, 判断为 α-Fe 和 Fe₇Ni₃ 物相的重叠峰, 同时包含 α-Fe 和 Fe₇Ni₃。XRD 衍射图谱表明样品含有 Co、α-Fe 和 Fe₇Ni₃。

4 结论

(1) 采用动网格与固体传热配合的方法, 模拟了不同工艺参数在激光熔覆增材制造的过程, 分析了其对最大温度与熔覆形貌的影响。不同工艺参数下的最大温度曲线趋势相同, 均为急剧升高, 在某一时间点保持稳定; 激光功率越大熔覆温度越高, 熔覆层随着激光束前移成型, 其前端在激光未达到时有成型趋势, 熔池前端温度梯度比尾部大, 形成了勺形熔池。

(2) 对不同工艺参数下不同方向的温度进行分析: 扫描方向的温度依次达到峰值, 且后到达点的温度大于前点的温度; 升温过程由慢到快, 激光功率越大温度曲线更加密集。竖直方向的温度在同一时

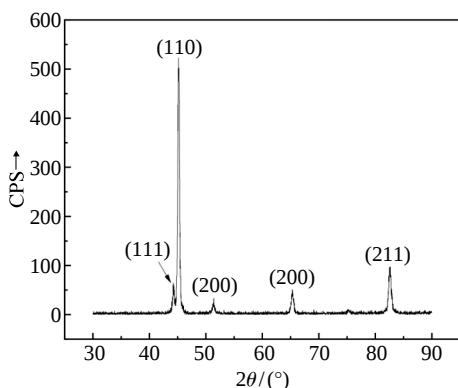


图 13 熔覆层的 XRD 分析(5[#] 试样)

Fig.13 XRD analysis of cladding layer (No.5 sample)

间全部达到峰值,功率越大温度梯度越大,推断熔覆层顶端晶粒将更密集、细小,熔覆层底部与基体交界处的组织沿着竖直方向优先生长。

(3) 根据仿真参数进行了试验验证,得到的熔覆层截面形貌基本一致,熔覆层形貌饱满具有金属光泽。对熔覆层出现的孔隙原因分析,可能由温度梯度和生长速度的增长率突然改变而导致的,获得了最优试验参数并进行观察。其显微组织顶部为细小的等轴晶和胞状晶;中部为等轴晶、胞状晶和柱状树枝晶;底部为柱状树枝晶并混有胞状晶。熔覆层含有 Co、 α -Fe 和 Fe_7Ni_3 金属间化合物。数值模拟与试验相结合的研究方法对马氏体时效钢激光熔覆增材制造的发展有着的参考意义。

参考文献:

- [1] 李虎,赵伟江,李瑞迪,等. 增材制造马氏体时效钢的研究进展[J]. 中国激光,2022,49(14):23-36.
- [2] 谭超林,周克崧,马文有,等. 激光增材制造成型马氏体时效钢研究进展[J]. 金属学报,2020,56(1):36-52.
- [3] 郭东明. 高性能制造[J]. 机械工程学报,2022,58(21):225-242.
- [4] Yang Z, Hao H, Gao Q, et al. Strengthening mechanism and high-temperature properties of H13+WC/ Y_2O_3 laser-cladding coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126544.
- [5] 雷靖峰,祁文军,谢亚东,等. U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25%WC 涂层工艺参数优化的研究[J]. 表面技术,2018,47(3):66-71.
- [6] 郭卫,李凯凯,柴蓉霞,等. 激光熔覆 304 不锈钢稀释效应的数值模拟与试验[J]. 激光与光电子学进展,2019,56(5):153-161.
- [7] 陆靖,孙文磊,陈子豪,等. 热作模具表面激光熔覆 H13 数值模拟及试验研究[J/OL]. 激光技术:1-12[2023-01-13].
- [8] 段伟,殷亚军,周建新,等. 钛合金 TC4 激光熔覆成形的数值模拟研究[J]. 热加工工艺,2018,47(16):155-159.
- [9] 袁景光,李宇,刘京南,等. 选区激光熔化金属成型熔池温度的在线检测[J]. 中国激光,2020,47(3):0302008.
- [10] Yi J L, Niu B, Pan L L, et al. Influence of WC grain size on the microstructure and wear property enhancement of 18Ni300 coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2022, 447: 1-10.
- [11] Huang Y, Ma W T, Zhang H M, et al. Numerical simulation of temperature field and deformation research in laser cladding repair process of slender shaft parts [J]. Electromechanical Equipment, 2017, 34(4): 28-34.
- [12] 罗心磊,刘美红,黎振华,等. 不同热源模型对选区激光熔化 18Ni300 温度场计算结果的影响[J]. 中国激光,2021,48(14):52-62.
- [13] 刘金朵. 复杂曲面零件激光熔覆控形控性关键技术研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2021.
- [14] 寇广鹏. 热作模具钢激光熔覆高熵合金研究[D]. 吉林:东北电力大学,2022.
- [15] Zhao Z J, Dong C F, Kong D C, et al. Influence of pore defects on the mechanical property and corrosion behavior of SLM 18Ni300 maraging steel [J]. Materials Characterization, 2021, 182: 111514.
- [16] 周勇,徐龙,周爽,等. 激光熔覆 316L 涂层晶粒生长取向与形貌对其耐腐蚀性能的影响[J/OL]. 表面技术:1-12[2023-01-13]. 

《热加工工艺》率先加入
《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)
Chinese Academic Journal (Network Edition)

主办单位: 清华控股有限公司
出版单位: 《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司
ISSN: 2096-4188 CN: 11-6032/Z
创刊年份: 2017 年