

三光束光内送丝激光熔覆温度场仿真分析与工艺优化

张吉平, 石世宏*, 蒋伟伟, 石拓, 吉绍山

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 针对三光束光内送丝熔覆工艺的温度场进行研究, 并对其工艺参数进行优化。建立了三光束光源的热源模型, 利用 ANSYS 软件对熔池的温度场进行仿真, 并结合工艺实验分析了离焦量、激光功率和扫描速度等工艺参数对熔覆层形貌的影响。仿真及实验结果表明: 离焦量对熔覆层高度的影响较大, 且会影响稀释区的形貌特征, 激光功率主要影响熔覆层的稀释率, 扫描速度对熔覆层高度的影响较大, 扫描方向的改变对熔覆层稀释区有一定的影响; 在离焦量为 -2 mm、激光功率为 1500 W、扫描速度为 5 mm/s 的条件下进行熔覆实验, 得到的熔覆层平整光滑, 无明显的熔覆缺陷, 熔覆层组织为马氏体, 硬度为 411 HV, 硬度的分布较为均匀。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 送丝; 温度场; 工艺参数

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1002004

Simulation Analysis of Temperature Field and Process Optimization of Laser Cladding Based on Internal Wire Feeding of Three Beams

Zhang Jiping, Shi Shihong*, Jiang Weiwei, Shi Tuo, Ji Shaoshan

School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract The temperature field is studied and the process parameters are optimized for the laser cladding based on the internal wire feeding of three beams. A heat source model of the three beams is established. The temperature field of the molten pool is simulated by using the ANSYS software. The effects of defocusing amount, laser power, and scanning speed on the morphology of the cladding layer are analyzed by experiments and simulations. The simulation and experimental results demonstrate that the defocusing amount considerably impacts the width of the cladding layer and the morphology of the dilution zone. The laser power mainly affects the dilution rate of the cladding layer, and the scanning speed considerably impacts the height of the cladding layer. Further, the change of the scanning direction impacts the dilution area of the cladding layer. The experiments are performed under a defocusing amount of -2 mm, a laser power of 1500 W, and a scanning speed of $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. The cladding layer is smooth and exhibits no obvious cladding defects. The cladding layer structure is martensite, the hardness is 411 HV, and the hardness distribution is relatively uniform.

Key words laser technique; laser cladding; wire feeding; temperature field; process parameter

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 140.6810

1 引 言

激光熔覆成形技术^[1]是以高能量激光束为热源熔化金属材料并进行逐层堆积, 进而形成零件实体的制造技术。根据材料添加时性状的不同, 熔覆成形技术可分为送粉式熔覆和送丝式熔覆两种^[2]。送丝式熔覆成形技术具有极高的材料利用率及环境污染小等特点, 近年来受到了人们的广泛关注。送丝

式熔覆根据丝材进给位置可分为光外送丝熔覆与光内送丝熔覆两种。本文采用实验室自主研发的三光束光内送丝熔覆喷头^[3]进行实验, 该喷头在熔覆过程中送丝平缓, 丝材受热均匀。

熔池的温度分布直接影响着熔池的对流、传质和传热过程, 进而影响熔覆层的形貌与质量, 因此对熔池温度场的研究至关重要。在激光熔覆成形过程中, 熔池具有升温快、温度高的特点, 采用实验测量

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-05-27; 录用日期: 2019-06-05

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFB1100300)、国家自然科学基金(51675359)

* E-mail: shishihong@suda.edu.cn

的方式很难得到熔池的温度场分布。目前,国内外很多研究者都通过数值模拟对熔池的温度场进行模拟^[4-5];孙进^[6]利用 ANSYS 仿真软件对侧向送丝熔覆成形进行了温度场和应力-应变场的有限元分析,并据此推测出熔覆层内部晶粒的生长方式以及熔道的热变形情况;戴德平等^[7]利用 Abaqus 软件对 718 镍基合金的单道多层熔覆过程进行了温度场和应力场的仿真,分析了激光熔覆过程的温度场分布、热循环特征以及残余应力的分布特点;Tseng 等^[8]提出了一种新的激光熔覆热源模型,在综合考虑了光束波长、光束半径、透射电镜模式和聚焦条件等的条件下,预测了预置钴粉层激光熔覆过程中的温度分布和熔覆层形貌,并在与数学模型相同的条件下进行了激光熔覆实验,验证了数值计算结果的正确性。上述研究主要针对的是圆形激光光斑熔覆方式,对于三光束激光光斑熔覆温度场尚缺乏深入研究。圆形激光光斑熔覆温度场的热源大部分可视作单个的高

斯热源,能量集中区域为光斑的中心,而三光束光内送丝激光熔覆温度场的热源是三个高斯热源的叠加,能量集中区域从中心变为外缘,能量分布更加均匀,同时能够改善圆形激光光斑熔覆时熔覆层边缘部分冶金结合较差的缺点。本文基于三光束光内送丝熔覆喷头建立了三光束光源的热源模型,利用 ANSYS 软件进行了熔池温度场的仿真,对熔覆层的形貌进行了预测与分析,优化了单道熔覆的工艺参数,为后续光内送丝熔覆成形工艺提供了实验与数据参考。

2 仿真模型的建立

三光束光内送丝熔覆喷头的光丝耦合原理如图 1 所示。图 1(a)为光丝耦合模型,激光被一组反射镜均匀地分成三束,随后会聚于同一点,该喷头可以实现丝材与光源的同轴,丝材受热均匀。实验中采用负离焦,当光束照射到基板上时形成 3 个光斑,光斑位置如图 1(b)所示。

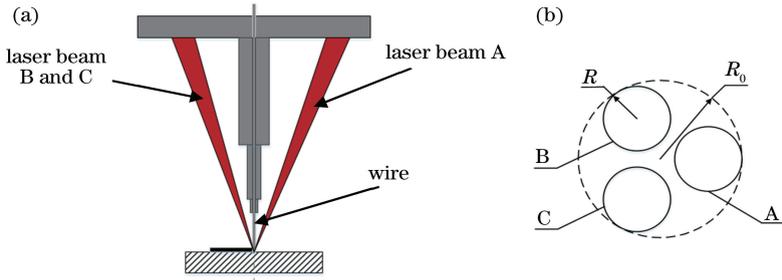


图 1 光丝耦合原理图。(a)耦合模型;(b)光斑位置

Fig. 1 Coupling principle of light and wire. (a) Coupling model; (b) light spot location

A、B 和 C 为 3 个独立的光斑, R 为独立光斑的半径,即热源作用的有效半径, R_0 为整体光斑的外径。热源模型可以视为三个高斯热源的叠加,高斯热源的热流密度可表示为

$$Q = ka \frac{P}{\pi R^2} \exp\left(-k \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

式中: Q 为任一点处的热流密度; k 为常系数; a 为激光吸收效率; P 为激光功率; r 为任意一点到高斯光源中心的距离。

为了减少仿真过程的计算时间,同时保证计算结果较为精确,截取基板的尺寸为 $20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 网格划分尺寸为 $0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 网格尺寸由熔池到基板边缘逐渐增大^[9]。网格划分使用 solid70 单元,该单元具有

8 个节点,每个节点有一个温度自由度,适用于瞬态与非瞬态热分析。激光熔覆是一个极为复杂的过程,包含着熔化、凝固、对流和辐射等。为了简化模型,使仿真计算便于实现,现进行如下假设^[10-12]:材料均为各向同性;材料的物理属性随温度的变化而变化;不考虑热辐射的影响;忽略熔池的流动和重力的影响。

3 实验与仿真结果分析

3.1 熔覆层形貌的预测与实验验证

采用 IPG YLS-2000-TR 光纤激光器进行熔覆实验,额定输出功率为 2000 W 。熔覆材料为碳钢实芯焊丝,其熔点约为 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$,丝材直径为 1.2 mm ,其化学成分如表 1 所示。熔覆基板材料为 304 不锈钢。

表 1 金属丝材的化学成分

Table 1 Chemical compositions of metal wire materials

Element	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu
Mass fraction /%	0.06-0.15	1.40-1.85	0.80-1.15	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.015	≤ 0.15	≤ 0.50

光斑的移动如图 2 所示, v 为扫描速度, 三个光斑围绕着丝材, 同时同向移动。利用 ANSYS 软件对熔覆过程进行温度场的仿真, 得到图 3 所示的熔池温度分布云图。由于高斯热源能量分布的特点是由中部到边缘能量逐渐降低, 且熔池后部的温度由于光斑 A 的加热而更高, 故熔池的最高温度区域为光斑 B 与 C 的中心。选取 E 和 F 点观察这两点的温度随时间的变化图, 如图 4(a) 所示。E 和 F 点的峰值温度分别为 1750 °C 和 1824 °C, 即对应光斑 B 与 A 处的最高温度。

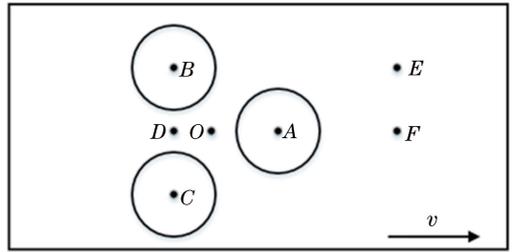


图 2 光斑移动示意图

Fig. 2 Diagram of movement of spot

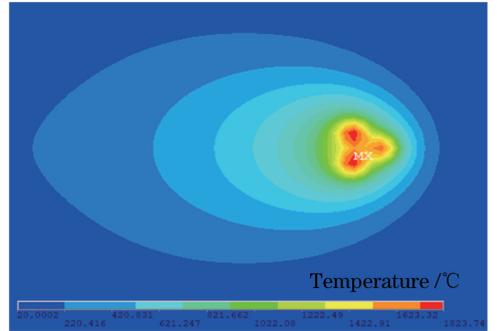


图 3 熔池温度分布云图

Fig. 3 Cloud chart of temperature distribution of molten pool

采用德国三铯 M322 双色红外测温仪测试温度, 温度测量范围为 800~3000 °C。测试方法为定点测试, 即温度测试仪固定不动, 熔覆过程中光斑移动并经过测试点。由于温度测试仪的测试点半径较大, 故只能测得 EF 线上的最高温度。测量得到的熔池温度曲线如图 4(b) 所示, 其中两个峰值分别为光斑 A 的中心点 A 经过 F 处时的峰值温度 1820.1 °C 和光斑 B 的中心点 B 经过 E 处时的峰值温度 1746.1 °C。将仿真结果中的温度曲线与实际测量的温度曲线进行对比, 发现两者基本一致, 由此证明了模型构建的合理性。

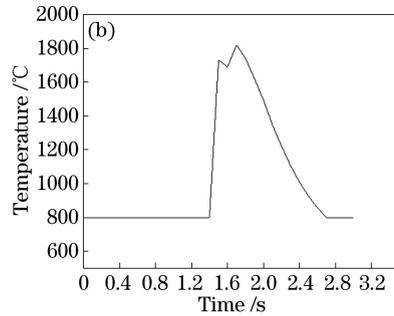
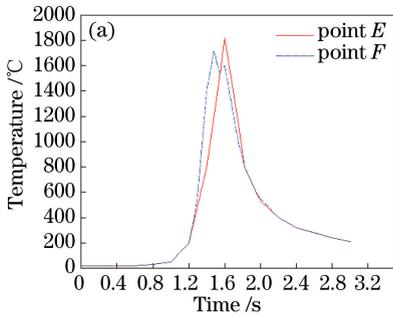


图 4 仿真和采用温度仪测试得到的温度曲线。(a) 仿真结果; (b) 温度仪测试值

Fig. 4 Diagrams of temperature curves obtained by simulation and measurement with thermometer.

(a) Simulation; (b) thermometer test

图 5 为基板纵切面和横截面上的温度分布云图, 光斑 B、C 中心的熔池温度较高且熔深较大, 而光斑 A 处的熔池温度较低且熔深较小, 图 5(c) 中高

温区(高于丝材熔点温度 1450 °C 的温度区域)呈现出 W 形。同工艺参数下得到的熔覆层的横断面如图 6 所示, 与图 5(c) 所示温度分布云图一致。结合

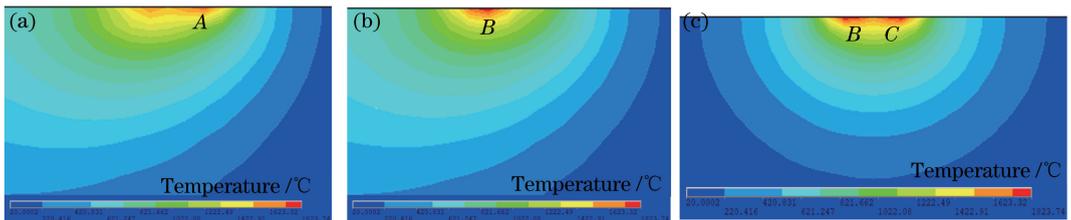


图 5 基板纵切面及横截面上的温度分布云图。(a) DF; (b) BE; (c) BC

Fig. 5 Temperature profiles of longitudinal section and cross section of basal plate. (a) DF; (b) BE; (c) BC

图 3, 光斑 B 和 C 处熔深最大, 在熔覆过程中决定了熔覆层稀释区的形貌, 因此可以利用 BC 线横截面温度分布云图来预测与分析熔覆层的形貌特征。



图 6 熔覆层的横断面形貌

Fig. 6 Cross section of cladding layer

3.2 离焦量的影响

离焦量是光斑焦点与熔覆层之间的距离, 离焦量的大小决定了光斑的半径。实验采用负离焦, 在其他参数不变的条件下, 随着离焦量增大, 熔覆层的宽度、高度和宽高比如表 2 所示。

由表 2 可知: 随着离焦量的增大, 熔覆层的宽度增大, 高度下降, 宽高比增大。随着离焦量的增大, 独立光斑的半径增大, 光斑之间的距离也增大, 整体光斑的覆盖范围扩大, 丝材熔化区域增大, 所以熔覆层的宽度增大。同时, 由于单位时间内进入熔池的丝材质量不变, 故熔覆层高度减小, 故而宽高比增大。宽高比是衡量熔覆层质量的重要参数之一, 宽高

表 2 不同离焦量下获得的熔覆层的宽度与高度
Table 2 Width and height of cladding layer obtained at different defocusing amounts

No.	Defocusing amount / mm	Width / mm	Height / mm	Ratio of width to height
1	-0.5	2.88	1.04	2.77
2	-1	3.22	1.02	3.15
3	-1.5	3.42	0.96	3.56
4	-2	3.66	0.82	4.46
5	-2.5	4.18	0.86	4.86
6	-3	4.50	0.78	5.77

比越大, 熔覆层的横向扩展能力越强^[2], 成形质量越好, 因此采用激光熔覆时需要选择较大的离焦量。

对于三光束光斑而言, 离焦量直接影响到熔覆层稀释区的形貌。当离焦量分别为 -2 mm 与 -1 mm 时, 熔池的温度分布如图 7 所示。可见: 当离焦量为 -2 mm 时, 熔池的最高温度为 1824 °C, 高温区呈 W 形; 当离焦量为 -1 mm 时, 熔池的最高温度为 2027 °C, 高温区域呈 V 形。相同工艺参数下熔覆层横断面的形貌如图 8 所示, 与温度场结果一致。该现象是由离焦量减小时, 光斑之间的距离减小, 高温区域逐渐靠近重叠所致。相对于 V 形稀释区, W 形稀释区能够改善熔覆层边缘处基体不能完全达到冶金结合的情况, 因此选取离焦量时应不小于 1.5 mm。

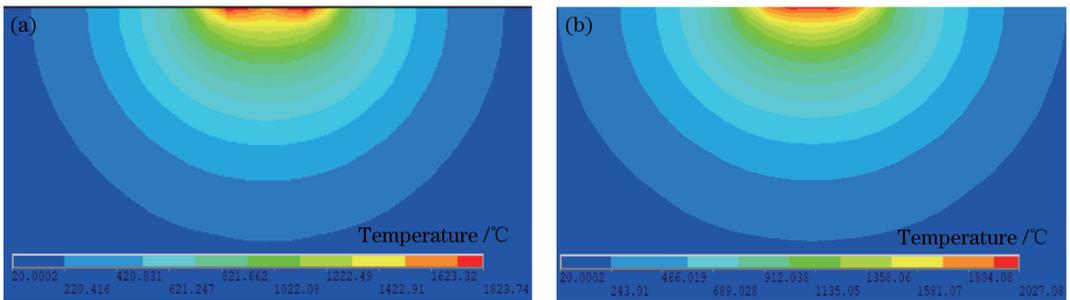


图 7 不同离焦量下的熔池温度分布云图。(a) -2 mm; (b) -1 mm

Fig. 7 Cloud charts of temperature distributions of molten pool at different defocusing amounts. (a) -2 mm; (b) -1 mm

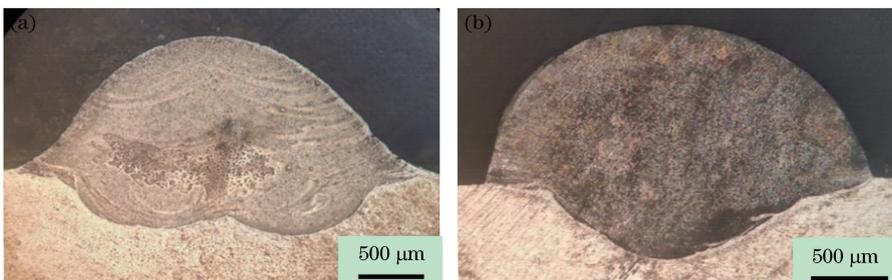


图 8 不同离焦量下制得的熔覆层的横断面形貌。(a) -2 mm; (b) -1 mm

Fig. 8 Cross sections of cladding layer obtained at different defocusing amounts. (a) -2 mm; (b) -1 mm

3.3 激光功率的影响

激光功率决定了光源能量输入的大小。在其他参数不变的条件下,随着激光功率逐渐增大,熔覆层的宽度、高度和宽高比如表 3 所示。

表 3 不同激光功率下得到的熔覆层的宽度与高度

Table 3 Width and height of cladding layer obtained at different laser powers

No.	Power / W	Width / mm	Height / mm	Ratio of width to Height
1	1300	3.52	0.80	4.40
2	1400	3.60	0.72	5.00
3	1500	3.70	0.68	5.44
4	1600	3.64	0.66	5.69
5	1700	3.80	0.62	6.13
6	1800	3.94	0.64	5.97

随着激光功率增大,熔覆层的宽度增大,高度下

降,宽高比增大。这是由于激光功率增大时,光斑的能量密度增大,熔覆层的熔宽与熔深增大,进而熔覆层的宽度和稀释率增大,但光斑尺寸未发生改变,故熔覆层的宽度变化幅度较小。稀释率是衡量熔覆层质量的另一个重要参数,在保证冶金结合的情况下,稀释率越小越好^[13]。激光功率分别为 1400 W 与 1700 W 时熔池的温度分布云图和熔覆层的横断面形貌如图 9 与图 10 所示。随着激光功率增大,熔池的最高温度由 1738 °C 升高到 1982 °C,高温区域范围扩大,熔覆层中部的熔深增大,稀释区由明显的 W 形逐渐向 V 形转变,熔覆层稀释率增大。同时在实验过程中发现,当激光功率过小时,丝材与基板得到的能量少,熔池温度低,丝材不能及时熔化,熔覆层表面出现波纹状。可见,为了得到宽高比大、稀释率小且形貌良好的熔道,需要合理地选择激光功率。

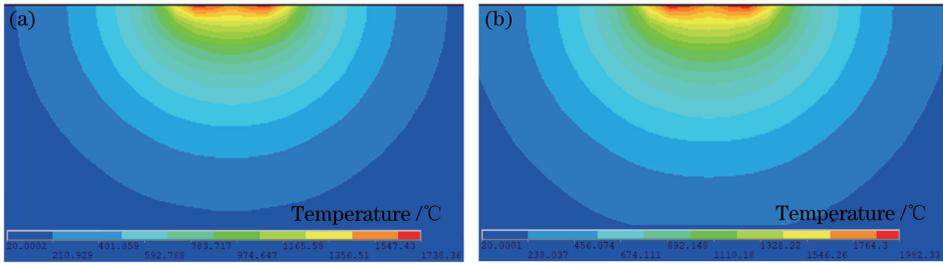


图 9 不同激光功率下的熔池温度分布云图。(a) 1400 W;(b) 1700 W

Fig. 9 Cloud charts of temperature distributions of molten pool at different laser powers. (a) 1400 W; (b) 1700 W

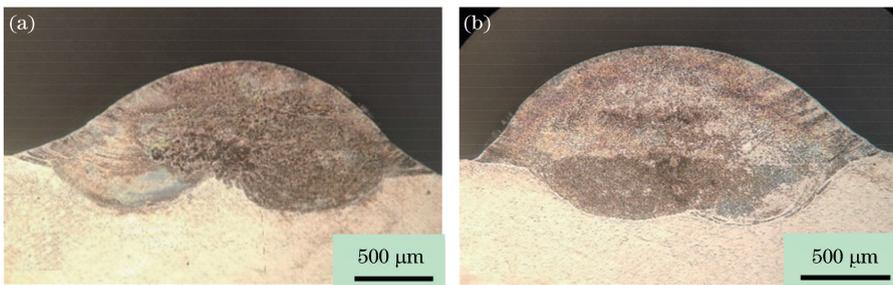


图 10 不同激光功率下得到的熔覆层的横断面形貌。(a) 1400 W;(b) 1700 W

Fig. 10 Cross sections of cladding layer obtained at different laser powers. (a) 1400 W; (b) 1700 W

3.4 扫描速度的影响

扫描速度反映了单位时间内光斑移动的距离。在其他参数不变的情况下,随着扫描速度增大,熔覆层的宽度、高度和宽高比如表 4 所示。

表 4 不同扫描速度下得到的熔覆层的宽度与高度

Table 4 Width and height of cladding layer obtained at different scanning speeds

No.	Speed / (mm·s ⁻¹)	Width / mm	Height / mm	Ratio of width to height
1	1.5	3.62	2.42	1.50
2	2	3.60	1.96	1.84
3	3	3.62	1.34	2.70
4	4	3.54	1.08	3.28
5	5	3.34	0.9	3.71
6	6	3.30	0.94	3.51
7	7	3.16	0.82	3.85

随着扫描速度增大,熔覆层的宽度减小,高度下降,宽高比增大。扫描速度直接影响单位时间内进入熔池的丝材质量,同时影响单位时间内丝材与基板对激光能量的吸收。随着扫描速度增大,单位时间内进入熔池的丝材质量减少,熔覆层高度显著下降。同时,熔覆层同一位置的熔池接

受能量的时间缩短,接受的能量减少,熔覆层熔深与熔宽均减小,进而使得熔覆层的宽度减小。扫描速度分别为3 mm/s与7 mm/s时熔池的温度分布云图和熔覆层的横断面形貌如图11和图12所示,可见:当扫描速度改变时,熔池高温区域的横

向分布变化较小,从而熔覆层宽度的变化较小。同时在实验中发现,扫描速度过大时,熔池在单位时间内吸收的能量少,熔池温度低,不能及时熔化丝材,无法形成完整的熔道,故不宜选择过大的扫描速度。

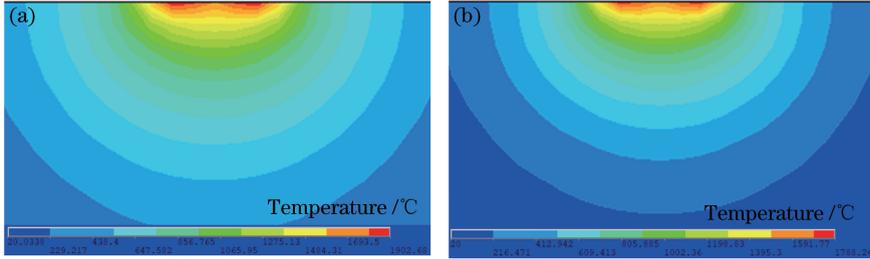


图 11 不同扫描速度下的熔池温度分布云图。(a) 3 mm/s;(b) 7 mm/s

Fig. 11 Cloud charts of temperature distributions of molten pool at different scanning speeds. (a) 3 mm/s; (b) 7 mm/s

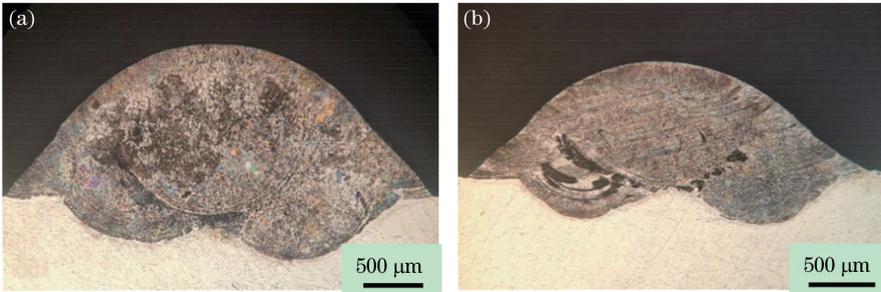


图 12 不同扫描速度下得到的熔覆层的横断面形貌。(a) 3 mm/s;(b) 7 mm/s

Fig. 12 Cross sections of cladding layer obtained at different scanning speeds. (a) 3 mm/s; (b) 7 mm/s

3.5 扫描方向的影响

光外侧向送丝熔覆时丝材为单边受热,三光束内同轴送丝熔覆过程中光斑围绕着丝材,丝材受热较为均匀。由于三个光斑呈正三角形分布,故在 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围进行扫描方向实验。选取离焦量为 -2 mm ,每隔 15° 进行一次激光熔覆,温度场云图

及对应的熔覆层的横断面形貌如图13和图14所示。在 0° 与 60° 时,熔池最高温度区域沿扫描方向对称分布,稀释区呈W形,其余位置的熔池为近V形,且熔深最大处偏向熔覆层一侧。因此在熔覆过程中应尽量选择 0° 与 60° 的方向进行熔覆,以便得到质量较高的熔覆层。

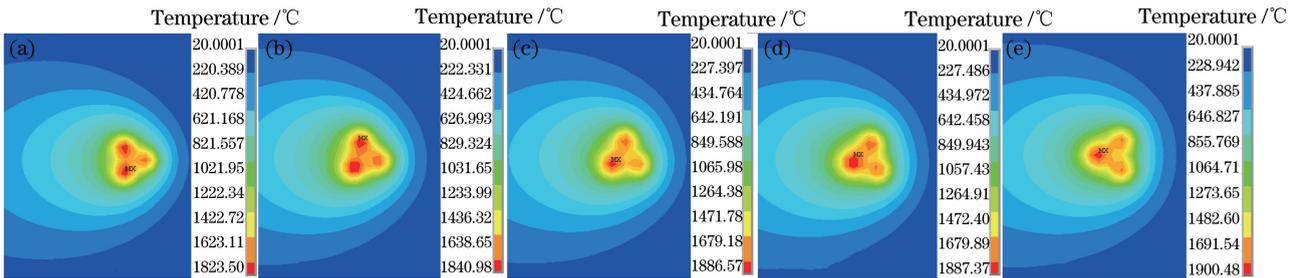


图 13 不同扫描方向下的温度场云图。(a) 0° ;(b) 15° ;(c) 30° ;(d) 45° ;(e) 60°

Fig. 13 Cloud charts of temperature field at different scanning directions. (a) 0° ; (b) 15° ; (c) 30° ; (d) 45° ; (e) 60°

3.6 优化实验与组织分析

通过仿真与实验分析得到了能够较好地进行熔覆的工艺参数范围:离焦量为 $-1.5\sim -2.5\text{ mm}$,激光功率为 $1400\sim 1800\text{ W}$,扫描速度为 $3\sim 7\text{ mm/s}$ 。选取离焦量为 -2 mm 、激光功率为 1500 W 、扫描速

度为 5 mm/s 进行单道熔覆实验,得到的熔覆单道、截面及组织如图15所示。熔覆层表面平整光滑,无明显缺陷,宽高比为 3.72 ,稀释率为 33.6% 。如图14(c)所示,熔覆层中部区域主要为马氏体组织,这是由于激光熔覆是一种快冷快热的加工工艺,熔覆

层在熔覆过程中快速冷却生成了马氏体。提取图 15(b)所示 5 个位置处的仿真温度值,并在这几个位置处进行硬度测试,得到的结果如图 16 和图 17 所示。一般来说,金属的晶粒越细小,其硬度就越高。

如图 16 所示,熔覆层中部温度较低而边缘温度较高,且熔覆层边缘散热条件较好而中部散热较差,故熔覆层整体温度梯度趋于平缓,熔覆层内部晶粒尺寸比较接近,硬度分布较为均匀,平均值为 411 HV。

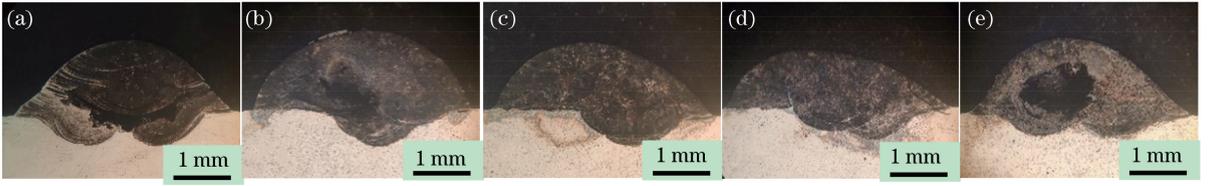


图 14 不同扫描方向下得到的熔覆层的横断面形貌。(a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°; (e) 60°

Fig. 14 Cross sections of cladding layer obtained at different scanning directions. (a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°; (e) 60°

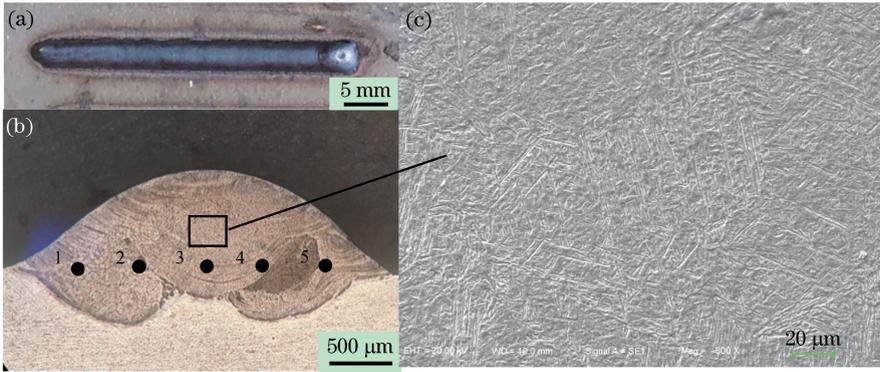


图 15 单道熔覆层及横截面形貌。(a)单道;(b)截面;(c)组织

Fig. 15 Single cladding layer and cross section. (a) Cladding layer; (b) cross section; (c) texture

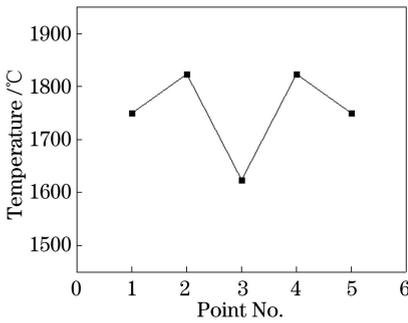


图 16 熔覆层的仿真温度

Fig. 16 Simulation temperature of cladding layer

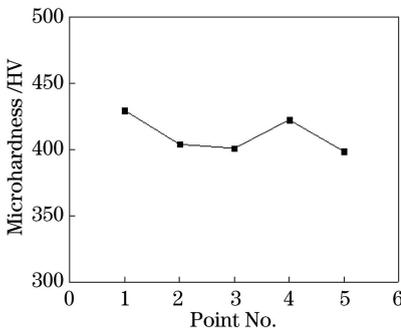


图 17 熔覆层的显微硬度

Fig. 17 Microhardness of cladding layer

4 结 论

基于三光束光内送丝熔覆喷头,采用 ANSYS 软件分析了熔池的温度场,并对熔覆层的形貌进行了预测和验证,得出如下结论:建立的三光束热源模型能够较为合理地反映熔池的温度场;离焦量的减小会使熔覆层稀释区形状由 W 形向 V 形转变;扫描方向对稀释区的对称性有一定的影响,应尽量选取 0°与 60°方向进行熔覆;在优化的工艺参数下能得到平整光滑、质量较高的单道熔覆层。

通过仿真与实验分析对单道熔覆工艺参数进行了优化,但并未对多道多层熔覆成形工艺进行研究。下一步计划进行多道多层熔覆成形实验,进一步分析样件的组织、性能与工艺参数的关系。

参 考 文 献

- [1] Liu Y, Ren X H, Chang Y L, *et al.* Research status of metal additive manufacturing technology[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(19): 15-24.
刘勇, 任香会, 常云龙, 等. 金属增材制造技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2018, 47(19): 15-24.
- [2] Li K B, Li D, Liu D Y, *et al.* Research of fiber laser

- cladding repairing process with wire feeding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1103006.
- 李凯斌, 李东, 刘东宇, 等. 光纤激光送丝熔覆修复工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103006.
- [3] Ji S S, Fu G Y, Shi S H, *et al.* A multi-beam laser cladding apparatus: 106583726[P]. 2017-04-26.
- 吉绍山, 傅戈雁, 石世宏, 等. 激光多光束熔覆装置: 106583726[P]. 2017-04-26.
- [4] Dang Y X, Qi W J, Lu L L. Research status and development trend of numerical simulation of laser cladding technology [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(6): 23-27.
- 党元晓, 祁文军, 芦丽丽. 激光熔覆技术数值模拟研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 23-27.
- [5] Dong D M, Chen J F, Lei W N. Research status of laser cladding [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(16): 9-13.
- 董冬梅, 陈菊芳, 雷卫宁. 激光熔覆的研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(16): 9-13.
- [6] Sun J. Process research and numerical simulation of laser cladding fabrication technology feeding by side [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012: 45-79.
- 孙进. 侧向送丝激光熔覆成型技术的工艺研究及其数值模拟[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 45-79.
- [7] Dai D P, Jiang X H, Cai J P, *et al.* Numerical simulation of temperature field and stress distribution in Inconel718 Ni base alloy induced by laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0903005.
- 戴德平, 蒋小华, 蔡建鹏, 等. 激光熔覆 Inconel718 镍基合金温度场与应力场模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903005.
- [8] Tseng W C, Aoh J N. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 141-152.
- [9] Ren Z H, Wu M P, Tang Y H, *et al.* Numerical simulation and experimental research of laser cladding based on thermo-mechanical coupling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051404.
- 任仲贺, 武美萍, 唐又红, 等. 基于热力耦合的激光熔覆数值模拟与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051404.
- [10] Wang T, Qin L C, Liu J Q. Temperature field simulation and experimental verification of laser cladding CoNiCrAlY based on finite element [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(18): 154-157, 161.
- 王涛, 秦令超, 刘佳奇. 基于有限元的激光熔覆 CoNiCrAlY 温度场模拟及实验验证 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 154-157, 161.
- [11] Cao S S. Simulation of temperature field and experimental study of 3D laser cladding Fe-based alloy [D]. Nanchang: Nanchang University, 2017: 13-14.
- 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: 13-14.
- [12] Li L Q, Wang J D, Wu C C, *et al.* Temperature field of molten pool and microstructure property in laser melting depositions of Ti6Al4V [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302009.
- 李俐群, 王建东, 吴潮潮, 等. Ti6Al4V 激光熔化沉积熔池温度场与微观组织特性 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302009.
- [13] Pan H, Zhao J F, Liu Y L, *et al.* Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloy by laser cladding reparation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0403007.
- 潘浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403007.