

光学学报

基于激光内送粉的十字交叉结构熔覆成形工艺研究

李建宾¹, 石拓^{2*}, 傅戈雁^{1**}, 王明雨¹, 王宇¹, 李天奕², 刘广¹

¹苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021;

²苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006

摘要 基于激光内送粉熔覆技术, 采取在交叉重叠部位进行局部加速的策略, 进行了十字形结构的越过式交叉成形工艺研究。首先, 提出了交叉不等高沉积工艺, 根据质量守恒定律计算进入熔池的粉末质量和熔覆层成形质量, 联立等式后得到了先成形横向熔道对后成形纵向熔道高度的影响规律。然后, 建立了速度不等高数学模型, 结合交叉不等高沉积工艺, 计算出令交叉部位叠加高度与未交叉部位熔道高度相等时的扫描速度。最后, 根据自愈合效应和体积流动假设, 提出了一种缩减加速段距离的工艺方法, 解决了提速后熔道交叉结合部位出现凹陷的问题。结果表明: 成形件十字交叉部位的高度尺寸误差在 1.76% 以内; 总体显微硬度在 257.5~296.8 HV 之间, 最终成形件表面平整光亮, 无宏观裂纹或夹杂缺陷。

关键词 激光光学; 光内送粉; 激光熔覆; 十字交叉结构件; 交叉不等高沉积; 越过式熔覆

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1614002

Cladding Forming Technology of Cross Structure Based on Inside-Laser Powder Feeding

Li Jianbin¹, Shi Tuo^{2*}, Fu Geyan^{1**}, Wang Mingyu¹, Wang Yu¹, Li Tianyi², Liu Guang¹

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, Jiangsu, China;

²School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract By the cladding technology of inside-laser internal powder feeding, the crossing cross-forming technology of cross structure is studied using the strategy of local acceleration in the overlapping position. First, the cross-unequal height deposition process is proposed. According to the law of mass conservation, the mass of powder entering the molten pool and the forming mass of the cladding layer are calculated, and the influence laws of the first formed transverse melting channel on the height of the later formed longitudinal melting channel by the system of equations are obtained. Then, a mathematical model of the unequal height of the velocity is built. On the basis of the cross-unequal height deposition process, the scanning speed is calculated when the overlapping height of the crossed position is equal to the height of the melting channel in the uncrossed position. Finally, in view of the self-healing effect and volume flow hypothesis, a process is put forward to reduce the range of the acceleration section, which solves the problem of sags in the cross-linking part of the melting channels after the acceleration. The results reveal that the height error in the crossed position is within 1.76%. The overall microhardness is between 257.5 HV and 296.8 HV, and the surface of the final formed part is smooth and bright, without macroscopic cracks or inclusion defects.

Key words laser optics; inside-light powder feeding; laser cladding; cross structure part; cross-unequal height deposition; crossing cladding

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-03-12; 录用日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(62173239)、江苏省自然科学基金(BK20190823)

通信作者: *shituo@suda.edu.cn; **fugeyan@suda.edu.cn

1 引言

十字交叉件^[1]是复杂金属零件的典型形式,如栅格结构、中央翼缘条和内部中空支撑等,在航空航天、轮机工程和机械制造等领域中得到了广泛的应用^[2-4]。常采用数控铣削、焊接和铸造等方式对十字交叉件进行加工,但这些方法存在材料利用率低或在嵌套结构和狭窄空间中无法加工等问题^[5-6]。激光熔覆成形是一种基于逐层熔覆堆积方式的增材制造技术,能够实现高性能复杂结构金属零件的无模具、快速近净成形^[7],因此利用激光熔覆技术成形十字交叉结构零件有着重要的研究价值。

目前,十字交叉结构件的成形研究已经取得了一定进展,多为连续路径分解搭接或分模块规划拼接成形技术的报道。例如:刘小冬^[8]针对交叉部位的熔道重叠问题提出了停光停粉控制熔道预留间隙以进行分部侧向搭接的解决方案,采用对熔覆路径进行分解的方法,实现了交叉部位无明显隆起成形,但该方法存在由熔池在停粉预留间隙位置流动引起的交叉前端熔道高度损失的问题;张讯等^[9]将十字交叉结构分解为环绕式搭接,熔覆成形出 C919 飞机中央翼缘条,但此方法的应用受限于熔覆光斑大小,不适用于成形薄壁类零件;Venturini 等^[10]采用四条短边垂直对接的方法进行十字交叉结构电弧增材成形,解决了熔道交叉凸起问题,但该方法加工余量过大,成形精度需进一步提高;Michel 等^[11]采用模块化路径规划,将短横截熔道竖向拼接成长熔道完成模块交叉,最终实现了成形件交叉局部无明显凸起,但该方法成形效率不高,同时存在成形表面波纹度偏高的问题。

现有文献对激光熔覆成形交叉结构零件的研究主要通过搭接间接地实现交叉熔覆,不可避免地降低了成形效率和粉末利用率。若采用直接越过式成形十字交叉结构,则存在熔道高度叠加的问题。同时,交叉先成形横向熔道对后成形纵向熔道沉积高度存在显著影响。上述问题极易导致交叉部位凸起,进而影响成形质量,甚至使成形过程无法继续进行。目前,采用直接越过式交叉方法在国内外鲜有报道。针对直接越过式交叉成形方法存在的问题,采用了自主研发搭建的中空环形光内送粉熔覆成形系统,提出了交叉不等高沉

积工艺,结合速度不等高模型和自愈合效应的研究,实现了交叉结构的高效率越过式熔覆成形。

2 实验设备和材料

本文实验设备主要包括中空环形光内送粉喷头、光纤激光器(美国,IPG, YLS-200-CT)、送粉器(德国, GTV, PF2/2),以及 6 轴机器人(德国, KUKA, KR30-3F)和旋转运动工作台(无锡信捷电气股份有限公司, MS-130ST)组成的动力装置。将质量分数为 99.99% 的氮气作为送粉载气、准直保护气 and 环境保护气。其中,中空环形光内送粉喷头为本课题组自主研发,原理如图 1 所示。经过光学准直器形成的实心圆形激光经由喷头 45° 锥镜和环状光学反射镜的反射作用产生环状聚焦激光束,金属粉末随送粉器载粉气输送至环状激光内中空位置处,并与准直保护气同轴输送形成粉末束,载气和保护气的共同作用克服了重力对粉末的影响,进而光粉气实现了高度耦合^[12]。与传统的光外送粉相比,光内送粉不仅提高了粉末集束性、稳定性和粉末利用率,还实现了空间任意角度的熔覆^[13-14]。粉末的光斑直径 $D(f)$ 的表达式为

$$D(f) = \begin{cases} D_0 - 2f \tan \theta, & f < 0 \\ D_0 + 2f \tan \theta, & f > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: D_0 为焦点处的光斑半径; f 为喷头相对焦点的提升量,即熔覆离焦量,当 $f > 0$ 时为正离焦,当 $f < 0$ 时为负离焦; θ 为激光熔覆喷头光路的外夹角。实验基板材料采用 304 不锈钢,熔覆材料选用 Fe316 铁基粉末,粉末粒度为 50~110 μm ,粉末的化学成分见表 1。

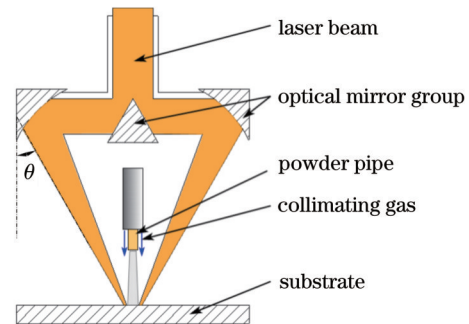


图 1 光内送粉原理

Fig. 1 Principle of inside-laser powder feeding

表 1 Fe316 铁基粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Fe316 iron-based powder

Element	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	P	C	S
Mass fraction / %	Bal.	17.300	12.400	2.300	2.100	1.000	0.100	0.100	0.045	0.030	0.030

3 越过式交叉成形工艺和模型

3.1 交叉不等高沉积工艺

后熔覆的单道在交叉时需要越过先熔覆的单道,此时实际熔覆参数会发生改变,进而两次加速后的熔覆层高度不再一致。本文建立等能量不等高沉积模

型,分析越过式熔覆成形时前后两次加速的熔覆层高度间的关系。粉末空间分布如图 2 所示,其中 r 为粉斑半径,在垂直于粉管轴线的熔覆平面建立 $x_0O_0y_0$ 坐标系, $X_1O_1Y_1$ 为熔覆平面在水平面上的投影面坐标系,当送粉管轴线竖直向下时,熔覆平面和水平面重合,两坐标系重合。

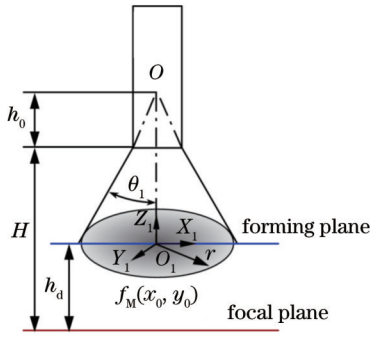


图 2 粉末空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of powder

由质量守恒定律可知,单位时间内进入熔池的粉末质量 m_1 与单位时间内熔覆凝固成形的粉末量 m_2 相等。光内送粉粉末的分布密度模型^[15]为

$$f_M(x_0, y_0) = \frac{9M_p}{2\pi[(h_0 + H - h_d)\tan\theta_1]^2} \times \exp\left\{\frac{9(x_0^2 + y_0^2)}{2[(h_0 + H - h_d)\tan\theta_1]^2}\right\}, \quad (2)$$

式中: M_p 为送粉速率; h_0 为初始粉末分散位置到送粉管出口的距离; H 为送粉管出口到焦点平面的距离; h_d 为熔覆平面到焦点平面的距离; θ_1 为粉末发散角。单位时间内进入熔池的粉末质量 m_1 可表示为

$$m_1 = \iint_{S_D} f_M(x_0, y_0) dx_0 dy_0, \quad (3)$$

面域方程 S_D 为

$$x_0^2 + y_0^2 = (w/2)^2, \quad (4)$$

式中: w 为熔覆层单道的宽度。在负离焦熔覆时,通过熔覆层空间形貌可计算得到单位时间内成形熔覆层的质量 m_2 , 即

$$m_2 = \rho V = \rho V_s \int_{-w/2}^{w/2} \left(-\frac{4h}{w^2} x_0^2 + h\right) dx_0, \quad (5)$$

式中: ρ 为熔覆层密度; V 为单道熔覆层的体积; V_s 为扫描速度; h 为单道熔覆层的高度。联立式(2)~(5),

表 2 优化后的初始单道熔覆层参数

Table 2 Parameters of initial single-channel cladding layer after optimization

Laser power / W	Defocusing distance / mm	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Power feeding rate / (g·min ⁻¹)	Carrier gas flow / MPa
1050	-3.5	7.5	24.5	0.3

由表 3 可知:扫描速度对熔覆单道的宽度影响较小,与熔覆层高度成负相关;熔覆层高度值随扫描速度的提高而下降,同时其变化幅度在减小。这是因为:当扫描速度较低时,单位长度内激光与粉末相互作用时间较长,熔池寿命较长,熔覆层呈现出一定的宽化现象;当扫描速度增大时,光粉相互作用时间缩短,熔池寿命变短,熔覆层高度因此降低。有研究^[17]表明,熔覆

可得

$$h = \frac{3V_{\text{gas}}M_p e^{9w^2/8[(h_0+H-h_d)\tan\theta_1]^2}}{2\omega\rho V_s}, \quad (6)$$

式中: V_{gas} 为载气流速度,数值上近似等于粉末流动速度。本次实验中十字垂直两熔道各位置处的速度相同,设未加速单道高度为 H_0 ,离焦量为 f_0 ,且令 $f_0 < 0$ 。加速后交叉位置处两次熔覆层单层高度分别为 h_1, h_2 ,令 $H_0 = h_1 + h_2$,结合式(6),解方程可得第二次熔覆层与第一次熔覆层的高度比 E 和加速单道高度 h_1 的表达式,即

$$E = \frac{h_2}{h_1} = \frac{\omega_1 e^{9w_1^2/8[(h_0+H-h_{d_2})\tan\theta_1]^2}}{\omega_2 e^{9w_2^2/8[(h_0+H-h_{d_1})\tan\theta_1]^2}}, \quad (7)$$

$$h_1 = \frac{H_0}{1+E}, \quad (8)$$

式中: ω_1 和 ω_2 为前后两次熔覆层的宽度; h_{d_1} 和 h_{d_2} 为两次熔覆过程中基面到焦点平面的距离。由式(1)可知

$$\begin{cases} h_{d_1} = -f_0 \\ h_{d_2} = -f_0 + h_1 \\ \omega_1 = D(f_0) = D_0 - 2f_0 \tan\theta \\ \omega_2 = D(f_0 + h_1) = D_0 - 2(f_0 + h_1) \tan\theta \end{cases}, \quad (9)$$

联立式(7)和式(8)可得到关于 h_1 的三次方求解方程,将各设备参数和工艺参数代入方程中即可求得加速后的单道高度 h_1 的值。

3.2 速度不等高成形模型

影响成形中熔覆层的高度的主要因素按程度由高到低依次为扫描速度、激光功率、熔覆喷头离焦量和送粉速率^[16]。依靠调节送粉速率和送粉保护气大小来控制熔覆层高度的方法具有延迟性,不利于实现工艺的稳定性与粉末的高效利用。改变离焦量对熔道宽度的影响也较大。为简化工艺、实现更好的应用性与稳定性,实验保持除速度外的其他参数不变,仅在两单道熔覆层十字交叉部位进行加速,实现越过式交叉熔覆。表 2 为通过正交优化得到的初始常速熔覆层的单道参数。表 3 为不同速度下的熔覆层单道高度、宽度和熔覆层形貌。

单道高度 h 与扫描速度 v 间存在线性关系,有

$$h = r' \cdot v^\alpha + s, \quad (10)$$

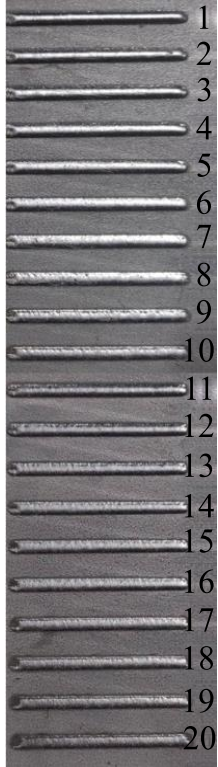
式中: r' 和 s 为常数项; α 为拟合系数。对表 3 中各实验数据进行非线性拟合处理,去除第 20 道不均匀单道熔覆层,可得熔覆高度 h 与扫描速度 v 的关系式,即

$$h = -10.87737 \cdot v^{0.06231} + 12.99122, \quad (11)$$

式(11)的检验系数为 1.533×10^{-4} ,残差平方和为

表 3 不同扫描速度下的单道熔覆层宽度、高度和表面形貌

Table 3 Width, height and surface topography of single-channel cladding layer at different scanning speeds

No.	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Width / mm	Height / mm	Surface topography
1	5.5	2.89	0.92	
2	6.0	2.88	0.83	
3	6.5	2.86	0.75	
4	7.0	2.83	0.70	
5	7.5	2.82	0.66	
6	8.0	2.80	0.60	
7	8.5	2.82	0.56	
8	9.0	2.80	0.51	
9	9.5	2.74	0.48	
10	10.0	2.78	0.45	
11	10.5	2.74	0.40	
12	11.0	2.78	0.36	
13	11.5	2.74	0.34	
14	12.0	2.68	0.29	
15	12.5	2.70	0.26	
16	13.0	2.66	0.22	
17	13.5	2.64	0.18	
18	14.0	2.60	0.17	
19	14.5	2.60	0.16	
20	15.0			

0.00245,说明该拟合结果具有较高的可靠性。将 h_1 代入式(10)可得加速后交叉部位的熔覆速度 v_1 为

$$v_1 = \sqrt{\frac{0.06231 \sqrt{12.99122 - h_1}}{10.87737}} \quad (12)$$

3.3 加速段缩减量计算模型

由图3可知,熔覆层截面形状近似二次函数曲线形状,为简化计算将纵横两道熔覆层外弧度曲率近似看成相等,当加速段缩减距离 l_1 为 0 时,熔道中加速起始部位处会产生倒三角形凹陷,这将使得熔覆单道平整度下降,甚至产生塌陷。有文献^[18]表明,光内送粉喷头在激光负离焦下存在自愈合效应,愈合高度约占自身熔覆层高度的 3%~6%。由于 l_1 远小于 w_1 ,机器人加速度远远大于速度变化量,故可忽略速度变化引起的距离变化。作出如下假设:

1) 缩减消失的 A_0 熔覆区域会使后一次交叉熔覆在顶部生成 A_1 区域熔池;

2) A_1 区域与缩减区域熔覆层体积符合交叉不等高成形原理,故令

$$S_{A_0} = \int_{-w_1/2}^{-w_1/2+l_1} \left(-\frac{4h_1}{w_1^2} n^2 + h_1 \right) dn, \quad (13)$$

$$S_{A_1} = ES_{A_0}, \quad (14)$$

$$S_{ax} = H_0(w_1 - 2l_1) - \int_{-w_1/2+l_1}^{w_1/2-l_1} \left[-\frac{4Eh_1}{w_1^2} n^2 + (1+E)h_1 \right] dn - 2S_{A_1}, \quad (15)$$

S_{ax} 为图4中带线阴影区域,即左侧凹陷部位面积,联立

式(13)~(15)可得

$$S_{ax} = -2H_0l_1 + H_0w_1 + 2h_1l_1 - \frac{2h_1Ew_1}{3} - h_1w_1, \quad (16)$$

取最小愈合占比 3% 为凹陷部位空间相于交叉部位空间的最大占比,即

$$S_{ax} = 0.03 \cdot H_0 \cdot (w_1 - 2l_1), \quad (17)$$

代入常数值后联立式(15)和式(16),可得到 l_1 的表达式,即

$$l_1 = \frac{91Ew_1 - 9w_1}{582E - 3}. \quad (18)$$

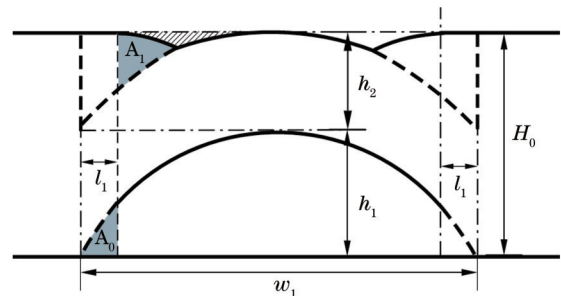


图 3 十字相贯交叉理想剖面图

Fig. 3 Ideal cross section of cross intersection

4 结果与讨论

4.1 “井”字形交叉结构构件建模和成形

设计越过式交叉堆积一个“井”字形垂直交叉结构

件。模型由 4 道高度均为 100.00 mm、宽度均为 2.82 mm 的熔覆直墙交叉组成,模型总宽度为 66 mm。结构件模型建立如图 4(a)所示。

本实验的工艺参数为功率为 1050 W,离焦量为 $f_0 = -3.50$ mm,送粉量为 20.5 g/min,初始扫描速度为 $v_0 = 7.50$ mm/s,可知 $H_0 = 0.66$ mm, $w_1 = 2.82$ mm,可求解得到加速后的熔道高度为 $h_1 = 0.252$ mm, $E = 1.62$,进而可得到交叉加速段的扫描速度为 $v_1 =$

12.63 mm/s。此外,可得到缩减量为 $l_1 = 0.42$ mm,加速段距离为 $w_1 - 2l_1 = 1.98$ mm。令层间提升量为 0.47 mm。实验采用本课题组自主研发的光内送粉喷头,粉末流细小、挺度高、集束性好,粉束始终垂直射向熔池,飞溅量较少。通过送粉喷嘴外环形气帘同熔池形成的强制对流,可显著提高熔池凝固速度,有效减少熔池拖尾过长所导致的坍塌等缺陷。熔覆成形过程如图 4(b)所示。

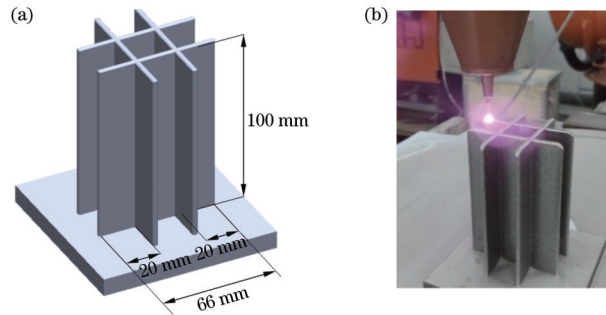


图 4 “井”字形交叉结构建模和成形。(a)结构件模型建立;(b)熔覆成形过程图

Fig. 4 Modeling and forming of "井"-shaped cross structure. (a) Modeling of structural part; (b) process of cladding forming

4.2 交叉成形件结果讨论

4.2.1 尺寸误差分析

在按照优化后的工艺参数进行加速交叉熔覆时,后成形的熔覆层单道的高度要高于先成形的熔覆层单道,这是因为加速后单位时间内进入熔池的粉末和激光能量都减少了,且粉末减少的幅度要大于激光能量的减少幅度,并且在后成形单道成形时需要越过先成形单道,此时熔覆基面上移,光斑变大,进入熔池的粉末量增多。

将成形件照片导入计算机辅助设计(CAD)软件,通过计算坐标差与标定标尺坐标差的比值得到成形件尺寸,成形件展示图如图 5 所示。该交叉结构件的顶

部距基体的最大高度和最小高度分别为 101.54 mm、100.39 mm,自身水平度相对误差为 1.15%,与理论设计尺寸(100 mm)的最大相对误差为 1.54%。交叉部位最大高度和最小高度分别为 101.76 mm、101.69 mm,与成形件最小高度(100.39 mm)的最大相对误差为 1.36%,与理论设计尺寸(100 mm)的最大相对误差为 1.76%。熔覆层始、中、末三部位平均宽度分别为 2.87 mm、2.73 mm 和 2.96 mm,与理论设计宽度尺寸(2.82 mm)的最大相对误差为 4.96%。由此可见,该成形件实际尺寸与理论尺寸相对误差较小、成形精度高,成形件无明显宏观裂纹等缺陷。

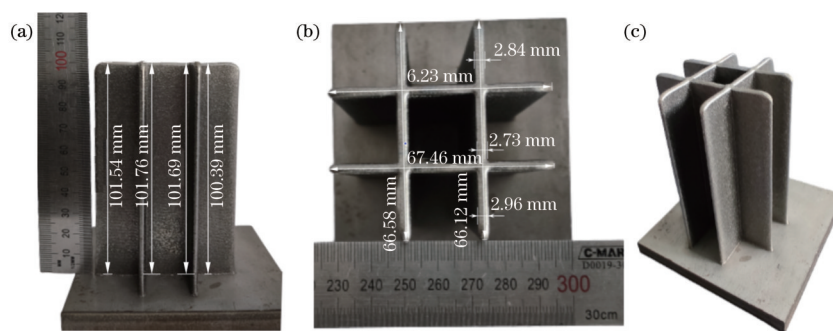


图 5 “井”字形熔覆成形件展示图。(a)主视图;(b)俯视图;(c)成形件侧面

Fig. 5 Display of "井"-shaped cladding forming part. (a) Main view; (b) top view; (c) side view of forming part

4.2.2 显微硬度分析

采用 MH-5 显微硬度计对所设计的交叉结构件中 6 个位置处的硬度进行测量,取样位置如图 6(a)所示,硬度计加载载荷为 500 g,保压时间为 10 s。分别在 6 个取样位置沿熔覆层生长方向进行 10 次显微硬度测量并取平均值,结果如图 6(b)、(c)所示。1、2、3 三个位置的显微硬度值的范围为 269.6~296.8 HV,取平

均后总体硬度范围为 280.96~284.16 HV。4、5、6 三个位置显微硬度值的范围为 257.5~287.3 HV,取平均后总体硬度范围为 268.25~270.24 HV,硬度值略有降低,这是因为交叉位置处存在两次激光能量沉积,该局部区域累积热量较高,过高的热量累积会使部分晶粒粗化。整体上成形件显微硬度基本保持稳定。

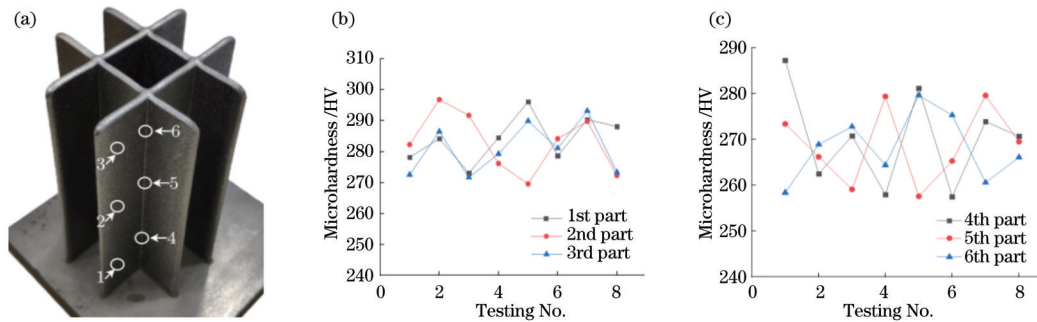


图 6 显微硬度测量。(a)取样位置示意图;(b) 1~3位置处的硬度值;(c) 4~6位置处的硬度值

Fig. 6 Microhardness measurement. (a) Schematic diagram of sampling location; (b) hardness values at positions 1-3; (c) hardness values at positions 4-6

5 结 论

提出了变速垂直交叉不等高激光熔覆成形方法,通过理论建模分析与成形工艺优化,可稳定实现交叉结构件成形,且最终成形件高度与设计高度误差保持在 1.76% 以内,解决了交叉区域局部凸起问题。此外,模型宽度随交叉部位成形速度改变稍有波动但总体均一。

保持激光功率不变,后加速成形单道在越过式熔覆时,熔覆平面上移,进入熔池的粉末增多,因此交叉越过式成形时后加速成形熔覆层的高度要高于先加速成形的熔覆层。

成形件交叉位置处受到两次扫描熔覆。交叉局部区域显微硬度略低于其他非交叉区域。整体而言,成形件显微硬度在 260~290 HV 范围内波动,具有一定的稳定性。综合上述,变速十字垂直交叉不等高沉积成形工艺进一步提升了激光熔覆技术对复杂垂直交叉结构零件的成形能力,为激光熔覆技术在更为广泛的领域中的拓展应用提供了支持。

参 考 文 献

- [1] 马倩, 马树元, 刘长猛, 等. 典型 TC4 框类结构 TIG 电弧增材制造工艺研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(1): 189-194.
Ma Q, Ma S Y, Liu C M, et al. Study on TIG arc additive manufacturing process of typical TC4 frame structure[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(1): 189-194.
- [2] 徐超, 姚卫星. 金属栅格加筋结构的并行协同优化方法[J]. 计算力学学报, 2019, 36(6): 813-817.
Xu C, Yao W X. Concurrent subspace optimum method for metal stiffened panel[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(6): 813-817.
- [3] 马国龙, 李俐群, 陈彦宾, 等. 十字交叉型接头双光束光纤激光焊接特性[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0734001.
Ma G L, Li L Q, Chen Y B, et al. Dual beam fiber laser welding characteristics of cross-type joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0734001.
- [4] 秦艳利, 孙博慧, 张昊, 等. 选区激光熔化铝合金及其复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402002.
Qin Y L, Sun B H, Zhang H, et al. Development of selective laser melted aluminum alloys and aluminum matrix composites in aerospace field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402002.
- [5] 刘强, 赵立彬, 迟大钊. 薄壁十字交叉激光焊结构缺陷超声 Lamb 波检测[J]. 焊接学报, 2021, 42(10): 40-43, 99.
Liu Q, Zhao L B, Chi D Z. Ultrasonic Lamb wave detection of defects in thin-walled cross laser welding structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(10): 40-43, 99.
- [6] 张景祺, 林健, 雷永平, 等. 栅格结构激光焊接失稳有限元分析[J]. 航空制造技术, 2021, 64(12): 61-69.
Zhang J Q, Lin J, Lei Y P, et al. Application of instability numerical model in preparation of grid structure by laser welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(12): 61-69.
- [7] 庞伟帆, 傅戈雁, 王明雨, 等. 基于响应面法和遗传神经网络模型的高沉积率激光熔覆参数优化[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602112.
Pang Y F, Fu G Y, Wang M Y, et al. Parameter optimization of high deposition rate laser cladding based on the response surface method and genetic neural network model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602112.
- [8] 刘小冬. 激光三维成形光内送粉变粉斑斑试验及交叉熔道堆积研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
Liu X D. Study on the variable powder spot test and the accumulation of cross cladding layers based on powder feeding inside-laser beam of three-dimensional laser prototyping[D]. Suzhou: Soochow University, 2011.
- [9] 张讯, 谭华, 钱远宏. 相交筋板结构激光立体成形的结构优化设计[J]. 应用激光, 2014, 34(1): 28-31.
Zhang X, Tan H, Qian Y H. Optimization design of the cross plate structure for laser solid forming[J]. Applied Laser, 2014, 34(1): 28-31.
- [10] Venturini G, Montevecchi F, Bandini F, et al. Feature based three axes computer aided manufacturing software for wire arc additive manufacturing dedicated to thin walled components[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 643-657.

- [11] Michel F, Lockett H, Ding J L, et al. A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 60: 1-11.
- [12] 龚燕琪, 傅戈雁, 石拓, 等. 开放环境下钛合金激光熔覆的局部气氛保护模型[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1102006.
Gong Y Q, Fu G Y, Shi T, et al. Local shielding gas model for laser cladding of titanium alloy in open environment[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1102006.
- [13] 王明雨, 石世宏, 石拓, 等. 基于光内送粉多元扭曲结构的随形离散分层成形研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 1002114.
Wang M Y, Shi S H, Shi T, et al. Conformal discrete layering of multivariant twisted structure based on inside-laser powder feeding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002114.
- [14] 张荣伟, 万乐, 石拓, 等. 薄壁空心球体的多自由度随形激光熔化沉积制备工艺与精度[J]. *中国激光*, 2021, 48(22): 2202018.
Zhang R W, Wan L, Shi T, et al. Multi-degree of freedom conformal laser metal deposition process and precision of thin-walled hollow sphere[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(22): 2202018.
- [15] 徐海岩. 316L 不锈钢激光熔覆实体成形控形工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Xu H Y. Study on shape control process of 316L stainless steel solid forming by laser cladding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [16] 梅有柱. 激光内送粉熔覆对表面精度的影响与控制研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.
Mei Y Z. Research on the influence and control of annular laser cladding on surface precision[D]. Suzhou: Soochow University, 2020.
- [17] Cheikh E H, Courant B, Branchu S, et al. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(3): 413-422.
- [18] 吴继璋, 朱刚贤, 陆斌, 等. 自愈合效应对光内送粉激光变斑熔覆成形薄壁件的影响[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(1): 145-150.
Wu J Z, Zhu G X, Lu B, et al. Influence of self-regulation-effect on forming quality of thin-walled parts with variable laser spot cladding[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(1): 145-150.