多阶模半导体激光增材制造工艺参数对熔覆层残余应力影响的数值模拟

赵亮[1]，　王丽芳[2*]，　朱刚贤[1]，　李广琪，　石世宏[1]
([1]苏州大学机电工程学院，江苏 苏州 215021；[2]苏州大学工程训练中心，江苏 苏州 215021)

摘要　为了研究多阶模半导体激光增材制造工艺参数对熔覆层残余应力的影响，利用 ANSYS 软件构建了单道熔覆层模型，运用生死单元法加载多阶模半导体激光为热源。采用正交试验法展开了工艺参数对熔覆层宽度与高度方向应力场分布规律的影响研究。结果表明：熔覆层宽度方向上的应力场左右对称并在中心处有明显的“平台效应”，体现了多阶模激光热源热量分布均匀的特点；熔覆层高度方向上，应力值沿熔覆层高度方向逐渐增大，直到熔覆层顶部达到最大值；工艺参数对残余应力的影响次序为：送粉速率＞扫描速度＞激光功率；当采用优化工艺参数计算时，熔覆层高度及宽度上的最大应力为 196.53 MPa和 98.22 MPa，有效地降低了残余应力值，为多阶模半导体激光增材制造中的残余应力调控提供了参考。

关键词　激光增材制造；　多阶模半导体激光；　应力场；　正交试验；　数值模拟
中图分类号：TN294　　**文献标志码**：A　　**doi**：10.14128/j.cnki.al.20214102.366

Numerical Simulation on the Influence of Process Parameters on Residual Stress in Cladding Layer by Multi-mode Semi-conductor Laser Additive Manufacturing

Zhao Liang[1]，　Wang Lifang[2]，　Zhu Gangxian[1]，　Li Guangqi[1]，　Shi Shihong[1]
([1]*School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu* 215021, *China*;
[2]*Engineering Training Center, Soochow University, Suzhou, Jiangsu* 215021, *China*)

Abstract　In order to study the influence of process parameters by multi-mode semiconductor laser additive manufacturing on the residual stress field of the cladding layer, ANSYS software was used to build a single-track cladding layer model. The multi-mode semiconductor laser heat source was loaded by using the life-and-death element method. Orthogonal experiment was used to study the influence of process parameters on the stress field distribution in the width and height of the cladding layer. The results show that the stress field along the width of the clad layer is symmetrical on both sides and has obvious platform effect at the center, which reflects the heat of multi-mode laser is average; In the height direction of the cladding layer, the stress increases gradually along the height until the surface of the cladding layer reaches the maximum value; The effect order of process parameters on residual stress is: powder feeding rate> scanning speed> laser power; The maximum stress on the width and height direction of the clad layer is 196.53 MPa and 98.22 MPa when the optimal process parameters are adopted, which greatly reduces the value of residual stress and provides a reference for controlling residual stress in cladding layer by multi-mode semi-conductor laser additive manufacturing.

Key words　laser additive manufacturing;　multi-mode semiconductor laser;　stress field;　orthogonal experiment;　numerical simulation

0　引言

激光增材制造技术是一种可直接制造出全致密且力学性能优良的金属零件的先进制造技术[1-2]，其利用高功率激光作为能量源熔化金属材料再冷却凝

收稿日期：2020-07-03
基金项目：国家重点研发计划(2016YFB1100300)
作者简介：赵亮(1994－)，男，硕士研究生。研究方向：激光金属增材制造技术。E-mail：1269957916@qq.com
*通讯作者：王丽芳(1979－)，女，硕士，实验师。研究方向：激光增材制造技术数值模拟。E-mail：lfwang@suda.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

固，逐层堆积形成三维立体零件[3-4]。在增材制造过程中，激光的加载过程实则是局部热源的输入，移动的熔池不断急冷急热交替的特征产生的局部热效应极易在熔池凝固以及冷却时产生残余应力[5]。残余应力直接影响零件的成形质量及性能，严重时会直接产生裂纹缺陷。所以研究激光增材制造温度场及应力场分布规律对提高成形件的质量及性能具有重要意义。

激光增材过程是一个急冷急热的非稳态过程。在成形过程中，熔池温度高且尺寸较小，难以直接用试验的方法测得熔池内的温度及应力分布情况。目前，广泛采用数值模拟的方法来研究激光增材制造过程中的温度场和应力场[6]。姚国风等[7]以激光熔凝表面强韧化处理为背景，研究激光熔凝加工中瞬时温度场及残余应力分布规律。Khamidullin 等[8]给出了激光熔覆过程中金属基体熔化和通过同轴喷嘴喷射粉末形成覆层的数学模型，模拟了金属晶体在凝固过程中的微观结构。高光启等[9]基于宽带激光模拟研究，发现在受激光辐照升温阶段，熔覆层表面主要表现为拉应力，而当工件逐渐冷却之后，残余应力逐渐演化为压应力。Liu 等[10]通过数值模拟研究了宽带激光熔覆工艺参数对熔覆层的影响，结果表明激光功率和扫描速度对热场和应力场的演化有重要影响。现有研究中的激光热源大多为高斯热源，对于选取多阶模激光开展激光增材制造温度场及应力场的研究相对较少。

本文针对多模半导体激光器，以 316L 不锈钢粉末为研究对象，运用 ANSYS 软件对激光增材制造过程中的温度场及应力场进行计算，通过正交试验获得最佳工艺参数组合，为试验工艺参数的选择提供指导。

1　激光增材制造有限元模型的建立

1.1　模型的简化和假设

激光增材制造是包括快速熔化、相变、冷却以及凝固等一系列复杂变化的瞬态热分析过程，如果将这些因素都考虑到模型中去，该模型会变得异常复杂。为了简化运算，对该模型做出如下假设[11-13]：

(1)忽略熔池内液体流动对温度场及应力场分布的影响。

(2)激光增材制造过程中，激光与材料相互作用时间短，激光功率相对较低，因此可以忽略金属的气化现象。

(3)基板与粉末材料呈各向同性，材料的密度不随温度变化。

(4)工件的外部环境温度为 20 ℃，熔覆层外表面的换热系数始终恒定。

(5)基材与金属粉末材料的屈服准则服从 Von-Mises 准则。

1.2　物理模型的建立

图 1(a)为激光增材制造熔覆层的有限元模型，其熔覆层的尺寸为 3 mm×30 mm×0.6 mm，基板的尺寸为 50 mm×50 mm×8 mm。选取 Soild70 作为热分析单元进行温度场模拟。在进行应力场计算时，将 Soild70 单元转换为 Soild45 单元来进行结构分析[14]。为了减少运算量加快计算速度，在网格划分时，在熔覆层及邻近区域采用较小的网格划分，在远离熔覆层的部分采用较大的网格划分，如图 1(b)所示。

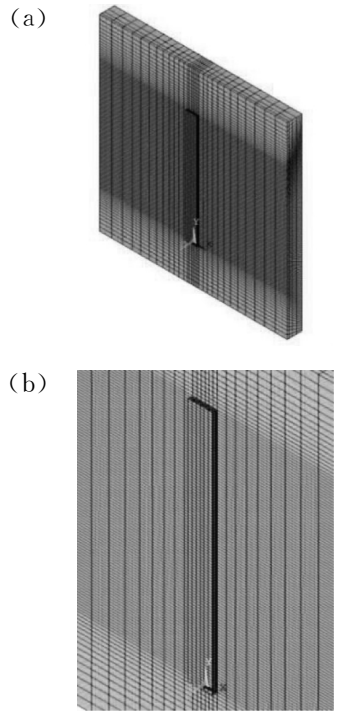


图 1　有限元模型及网格划分示意图
(a)整体图　(b)局部放大图

Fig. 1　Finite element model and schematic diagram of grid division

1.3　热源的选择及加载

在激光增材制造过程中，激光模式直接决定熔池的能量分布。本文采用多阶模半导体激光器为热源，其能量分布如图 2 所示，光斑内的光强分布较为均匀，光斑中心与光斑边缘的能量差异较小[15]，因此多阶模激光光斑内的热流密度为[16]：

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$Q(r)=\frac{\alpha P}{BL} \tag{1}$$

式中：P 为激光功率，α 为激光利用率，B 及 L 为矩形光斑的长和宽。

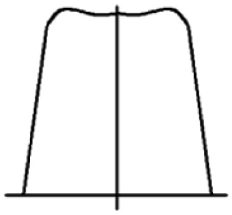


图 2　多阶模激光能量分布图

Fig. 2　Distribution diagram of multi-mode laser energy

为实现激光增材制造过程，在计算中采取生死单元法[17]实现热源的加载。生死单元法通过不断激活光斑扫略部分单元来实现光粉的同步，直至激光热源移动到熔覆层尾部完成整个熔覆过程。

1.4　材料的热物性参数及力学性能

激光增材制造计算模型中的基板与金属粉末材料均为 316L 不锈钢(00Cr17Ni14Mo2[18]，成分如表 1 所示)，通过查阅相关文献[19-20]，材料热物性参数和力学性能如表 2 所示(其中：T 为温度，C 为比热容，K 为导热系数，D 为材料密度，E 为弹性模量，α_t 为热膨胀系数，V 为泊松比，σ 为屈服应力，E' 为材料的切线模量)。

表 1　316L 不锈钢化学成分表

Tab. 1　Chemical composition table of 316L stainless steel

化学成分	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	P	S	Nb	Ti	Cu	Fe
质量分数/%	0.02	16.90	10.30	1.77	2.11	0.50	0.04	0.01	0.03	<0.01	0.39	>67.92

表 2　316L 不锈钢的热物性参数及力学性能

Tab. 2　Thermophysical parameters and mechanical properties of 316L stainless steel

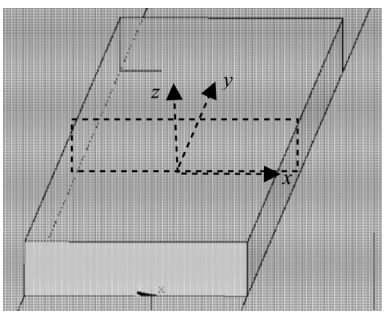
T/K	C/(J·kg^{-1}·K^{-1})	K/(W·m^{-1}·K^{-1})	D/(kg·m^{-3})	E/Pa	α_t/K^{-1}	V	σ/Pa	E'/Pa
293	477	12.6	8	2.21×10^{11}	15.3×10^{-6}	0.3	0.297×10^{9}	2.21×10^{10}
473	515	16.3	8	1.96×10^{11}	15.3×10^{-6}	0.3	0.221×10^{9}	1.96×10^{10}
673	550	19.8	8	1.86×10^{11}	15.3×10^{-6}	0.3	0.202×10^{9}	1.86×10^{10}
873	582	22.6	8					
973	611	23.9	8	1.55×10^{11}	15.3×10^{-6}	0.3	0.099×10^{9}	1.55×10^{10}
1 073	640	25.5	8					
1 173	669	26.4	8					
1 273	675	27.5	8	0.50×10^{11}	15.3×10^{-6}	0.3	0.089×10^{9}	0.50×10^{10}
1 473	739	29.7	8	0.35×10^{11}	15.3×10^{-6}	0.3	0.059×10^{9}	0.35×10^{10}
1 703	760	31.7	8					

上表中给出了部分温度区间中的 316L 不锈钢的热物性及力学参数，超过其温度段后，通过 ANSYS 自动外推和插值法功能可获得其他温度段的未知参数[16]。

1.5　路径规划与节点选取

为了便于分析温度场及应力场的分布规律，在熔覆层上选取特定的路径与节点进行研究，选定沿熔覆层深度方向为 z 轴，扫描方向为 y 轴，熔覆层宽度方向为 x 轴，如图 3(a)所示。在熔覆层的中心处($y=15$ mm)沿 x-z 平面剖开，得到如图 3(b)的截面。在此截面上分别定义路径 1 沿熔覆层高度方向与路径 2 沿熔覆层宽度方向。沿路径 1 方向在 z 轴由下至上均匀间隔选取 7 个点，同样沿路径 2 方向在 x 轴由左至右均匀间隔选取 7 个点，进行分析。

(a)



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

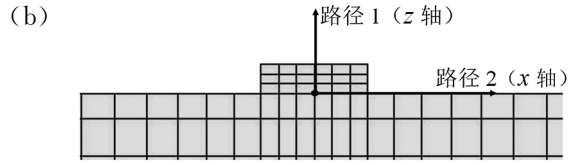


图 3　截面节点，路径位置示意图
(a)截面位置 (b)路径，节点位置
Fig. 3　Schematic diagram of cross-section nodes and paths

2　正交试验设计与分析

2.1　工艺参数的选取

在激光增材制造过程中，主要通过控制激光功率、扫描速度以及送粉速率等参数来调控熔覆过程[16]。送粉速率最直接的影响主要体现在熔覆层高度上，在忽略熔覆层宽度变化的情况下，送粉速率与熔覆层厚度近乎呈现正比关系[21]，因此可以通过设置不同的熔覆层厚度来模拟不同的送粉速率。根据前期的工艺试验可得，当送粉速率为 4 g/min、8 g/min以及 12 g/min 时，对应的熔覆层厚度为 0.31 mm、0.60 mm、0.88 mm。因此，确定了三因素三水平的工艺参数正交试验表，具体如表 3 所示。

表 3　正交试验因素与水平表

Tab. 3　Table of orthogonal experiment factors and levels

因素名称	激光功率/W	扫描速度/(mm·s^{-1})	送粉速率/(g·min^{-1})
水平 1	550	4	4
水平 2	750	6	8
水平 3	950	8	12

2.2　正交试验指标的确定

为了研究工艺参数对熔覆层应力场的影响规律，获得最优工艺参数组合，拟采用间接法，即先计算熔覆层温度场，在温度场计算的基础上再计算应力场。

选取了在激光功率 750 W、扫描速度 4 mm/s、送粉量 8 g/min 下，0.2 s 及 2.5 s 时刻对应的温度场分布云图，如图 4 所示。

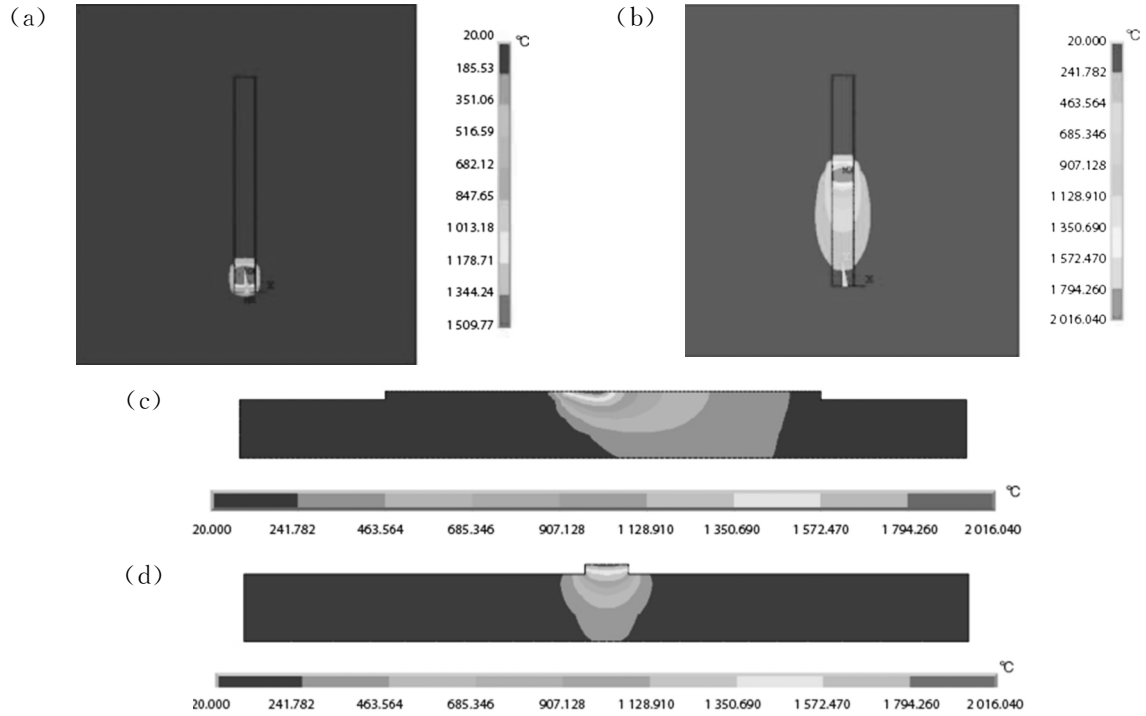


图 4　不同时刻的温度云图
(a)0.2 s (b)2.5 s (c)2.5 s 时沿 y-z 平面 (d)2.5 s 时沿 x-z 平面
Fig. 4　Cloud chart of temperature at different times

从温度云图中可以看出：熔覆的初始阶段，光斑的形状近乎是规则矩形光斑，最高温度为 1 509.77 ℃，光斑内大部分区域温度均匀且仅在近边界处略有下降。随着熔覆的进行，移动的光斑呈现彗星状，熔池前端的等温线也更加密集，但光斑内温度仍旧分布均匀。熔覆过程中温度均匀分布反映了光斑内光强的均匀分布，符合多阶模激光热源的特性证明了计算模型的准确性。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在温度场的基础上进行应力场的计算。为了使仿真结果更为准确，在仿真模型的基板底面两边线上施加了线约束来模拟实际加工中夹具对基板的固定作用。以下是对冷却时间 600 s 后的成形件残余应力的分析。图 5 为冷却后的成形件 x、y、z 三个方向和 Von-Mises 的残余应力分布云图。从图 5 中可以看出，Von-Mises 残余应力最大值出现在熔覆层上表面中段边界上，此时残余拉应力的最大值为 294 MPa。熔道拉应力呈现为椭圆状；y 方向残余应力熔覆层均表现为较强的拉应力，仅在熔道首尾两端的应力值较小；x 方向残余应力主要集中在熔覆层两侧，为拉应力，而首尾两端均表现为压应力；相较于其他方向，z 方向残余应力值较小，熔覆层两侧主要表现为压应力。

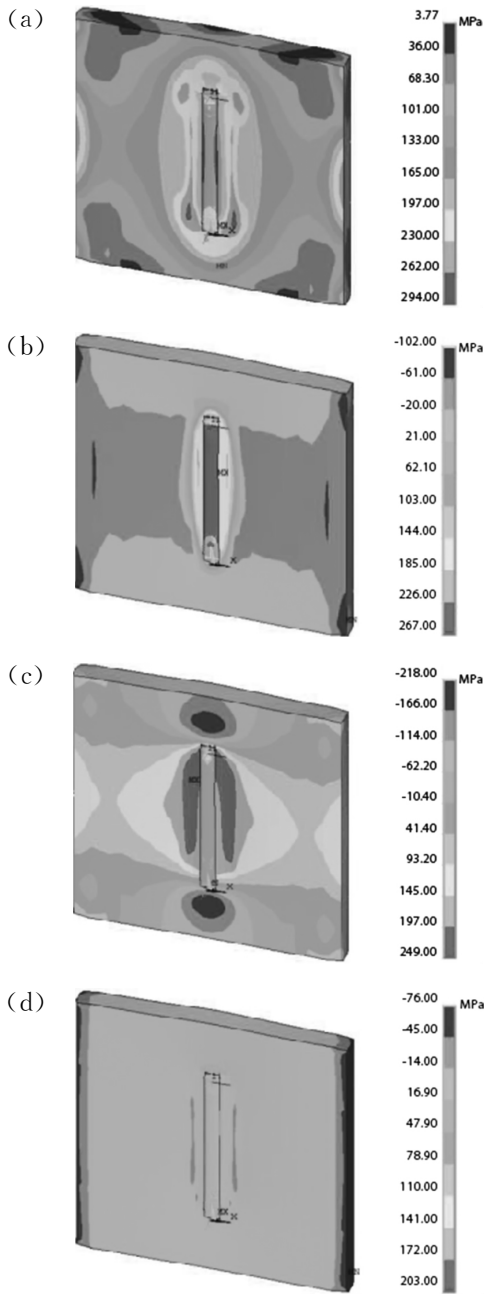


图 5　残余应力分布

(a)von-Mises　(b)y 方向　(c)x 方向　(d)z 方向

Fig. 5　Distribution of residual stress

以上仅仅分析了熔覆层表面残余应力的分布，为了进一步获得冷却后熔覆层内部残余应力分布情况，可通过路径 1 与路径 2 两个路径方向上的参考点残余应力值来分析熔覆层内部应力场的分布情况。图 6 为熔覆结束后冷却 600 s 的参考点应力值图。从图 6 可以看出：(1)从基板开始，随着高度增加，热传导作用加强，使熔覆层内部与基材的温差加大，造成温度梯度变大，所以路径 1 路径 y 向应力沿高度方向不断增大，在熔覆层表面最大，为 257.66 MPa；而路径 2 上的 y 向应力则在中心平台处得到最大值，为 162.42 MPa。(2)路径 2 的应力场左右对称，且各方向应力在中心处均呈现平台效应，再一次体现了多阶模激光热源能量分布均匀的特性。(3)路径 1 及路径 2 路径中各参考点 y 方向应力值基本上均大于 x、z 方向，因此应力场主要体现为沿扫描方向(y 向)的拉应力。

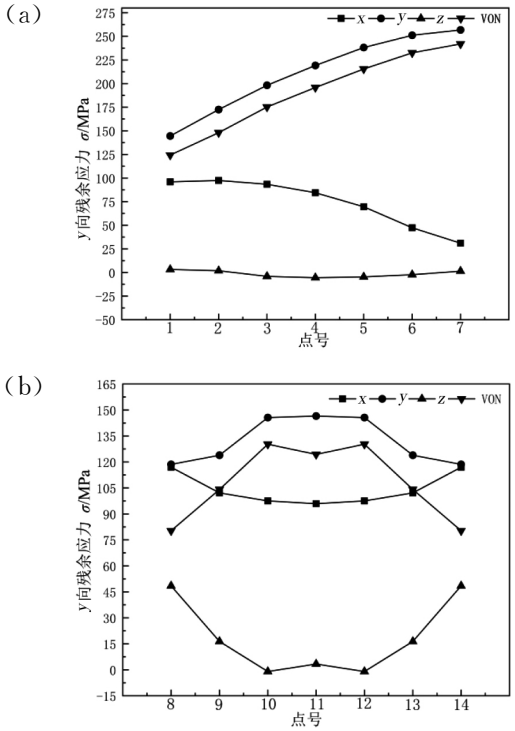


图 6　路径 1 和路径 2 路径上 σ_y、σ_x、σ_z 和 Von-Mises 的应力分布曲线

(a)路径 1　(b)路径 2

Fig. 6　Stress distribution curves of σ_y, σ_x, σ_z and Von-Mises on path1 and path2

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

通过以上对激光增材过程温度场及应力场的分析，发现应力主要体现在沿扫描方向，各参考点的 y 向应力值均大于其他方向。因此，可以将路径 1 与路径 2 两路径上沿 y 向即扫描方向的最大应力值作为评判正交试验的指标。

2.3 正交试验结果与分析

按照正交试验表对应的情况，分别计算应力场，获得的计算结果如表 4 所示。同时，为了获得熔覆层残余应力最小时对应的最优工艺参数组合，对正交试验表进行直观分析，如图 7 所示。

表 4　三因素对路径 1 及路径 2 上 y 向最大应力值的影响

Tab. 4　Influence of three factors on maximum stress value in y direction along path1 and path2

编号	激光功率/W	扫描速度/(mm·s^{-1})	送粉速率/(g·min^{-1})	路径 1 上 y 向最大应力值/MPa	路径 2 上 y 向最大应力值/MPa
1	550	4	4	228.65	202.62
2	550	6	8	245.54	167.16
3	550	8	12	224.91	142.43
4	750	4	8	231.18	132.33
5	750	6	12	226.21	176.38
6	750	8	4	241.71	203.51
7	950	4	12	201.45	169.06
8	950	6	4	251.04	172.25
9	950	8	8	246.60	170.91

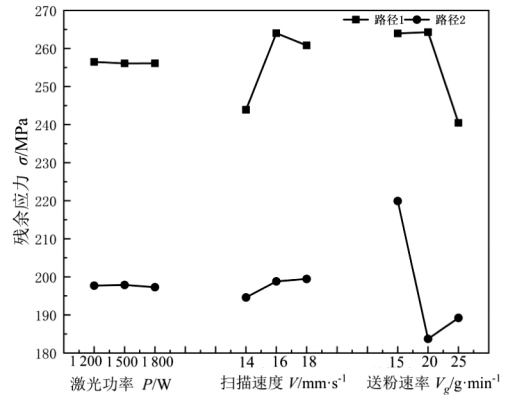


图 7　路径 1 及路径 2 路径上 y 向最大应力与因素水平的关系图

Fig. 7　Relationship diagram between maximum stress in y direction and factor level on path1 and path2

从图 7 的直观分析中可以看出，工艺参数对路径 1 及路径 2 上 y 向最大应力的影响次序为：送粉速率＞扫描速度＞激光功率。下面对三因素进行分析：(1)激光功率对路径 1 及路径 2 上 y 向最大应力的影响不大，这主要是由于多阶模激光能量分布均匀特性造成的。尽管激光能量变化，但光斑内光强均匀使得激光能量密度变化不大，继而由功率变化带来的温度差较小，因此残余应力对多阶模激光功率变化不敏感。(2)随着扫描速度不断加快，单位时间内单位区域激光辐照的热量不断变小，使得熔池变浅变小，路径 2 路径上各参考点的温度梯度变大，进而冷却后产生的 y 向残余应力变化明显。同时由于熔覆层宽度相对于厚度值较大，相应温度梯度变化较小，因此扫描速度的变化对路径 1 路径上 y 向应力的影响不大。(3)送粉速率决定了熔覆层厚度，而熔覆层厚度的变化，使得相同光强下高度方向上的温度梯度变化明显，因此熔覆层高度上 y 向应力随熔覆层厚度变化明显。同时，熔覆层高度的变化使得传到熔覆层底部的热量数值不一，因此其与基板的温差变化明显，熔池内流体产生的黏滞效应使得 y 向阻力变化明显，最终使得产生的沿扫描方向的应力发生变化。

结合以上讨论，同时为了满足使熔覆层宽度与高度方向上 y 向应力值最小的评判标准，选定的最优工艺参数组合为：激光功率 950 W，扫描速度 4 mm/s及送粉速率 8 g/min。此时，熔覆层的应力最小。

3　最优工艺参数验证

通过以上正交试验，得到了激光功率 950 W、扫描速度 4 mm/s 及送粉速率 8 g/min 的最优工艺参数，此时熔覆层的残余应力值最小。下面对该最优解进行验证，计算结果如图 8 所示。

从图 8 的应力分布曲线中可以看出，最优工艺

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参数得到的应力场符合之前得到的对应残余应力场分布规律。路径 1 和路径 2 路径上 y 向最大残余应力仅为 196.53 MPa 与 98.22 MPa。同时各参考点的应力差值变小，应力场分布更加平稳，证明通过该组工艺参数可以有效地降低熔覆层的残余应力，极大地降低了产生裂纹等缺陷的可能性。

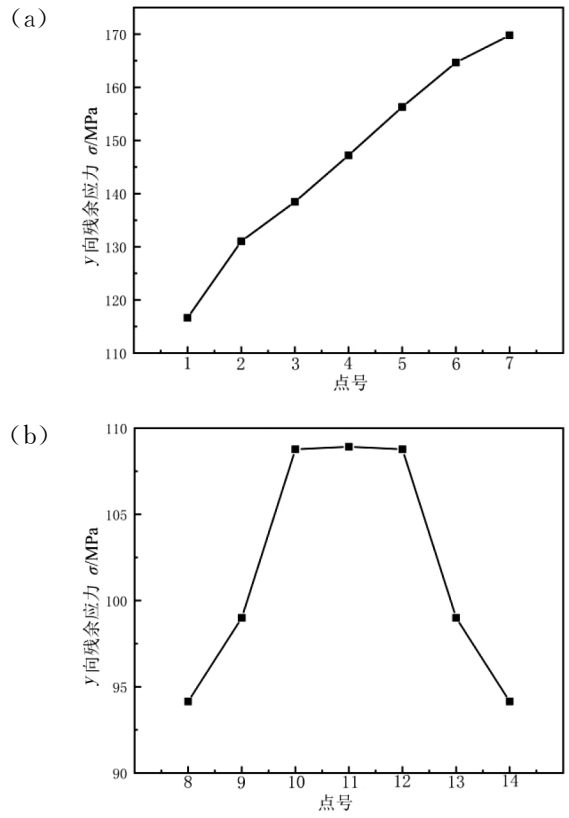


图 8　路径 1 和路径 2 路径上 y 方向残余应力的分布曲线

(a)路径 1　(b)路径 2

Fig. 8　Distribution curve of residual stress in y direction along path1 and path2

4　结论

(1)采用多阶模激光作为热源进行激光增材制造时，光斑范围内能量分布均匀，熔覆的初始阶段为近乎规则的矩形，继而呈现彗星状。应力场主要体现为沿扫描方向的拉应力，在熔覆层宽度方向上，应力场在中心处呈现明显的平台效应且此处的应力值最大；在熔覆层高度方向上，y 向应力沿高度方向变大并在熔覆层上表面取得最大值。

(2)经过正交试验直观分析，得到工艺参数对应力的影响效果从大到小同为：送粉速率＞扫描速度＞激光功率。

(3)最优工艺参数组为激光功率 950 W、扫描速度 4 mm/s 及送粉速率 8 g/min，此时熔覆层路径 1 及路径 2 路径上的最大应力仅为 196.53 MPa 与 98.22 MPa。通过对工艺参数的优化组合，改善了应力场分布情况，有效降低了熔覆层的残余应力值。

参考文献

[1] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京：中国计量出版社，1998：1-20.

[2] AHMED N. Direct metal fabrication in rapid prototyping：A review[J]. Journal of Manufacturing Processes，2019，42：167-191.

[3] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术 开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术，2013(3)：5-7.

[4] DUTTA B，SINGH V，NATU H，et al. Direct metal deposition[J]. Advanced Materials and Processes，2009，167(3)：29-31.

[5] 杨健，陈静，杨海欧，等. 激光快速成形过程中残余应力分布的实验研究[J]. 稀有金属材料与工程，2004，33(12)：1304-1307.

[6] TAMANNA N，CROUCH R，NAHER S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process[J]. Optics and Lasers in Engineering，2019，122：151-163.

[7] 姚国凤，陈光南. 激光熔凝加工中瞬时温度场及残余应力数值模拟[J]. 应用激光，2002，22(2)：241-243.

[8] KHAMIDULLIN B A，TSIVILSKIY I V，GORUNOV A I，et al. Modeling of the effect of powder parameters on laser cladding using coaxial nozzle[J]. Surface and Coatings Technology，2019，364：430-443.

[9] 高光启，王勇，占焕校，等. 宽带激光熔凝过程温度场及残余应力数值分析[J]. 中国表面工程，2008，21(2)：15-19.

[10] LIU H M，LI M B，QIN X P，et al. Numerical simulation and experimental analysis of wide-beam laser cladding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2019，100(1/2/3/4)：237-249.

[11] CHEW Y X，PANG J H L，BI G J，et al. Thermo-mechanical model for simulating laser cladding induced residual stresses with single and multiple clad beads[J]. Journal of Materials Processing Technology，2015，224：89-101.

[12] 朱晨光，孙耀宁，于青. 激光熔覆温度场的数值模拟研究进展[J]. 热加工工艺，2012，41(8)：132-134.

[13] 李美艳，韩彬，蔡春波，等. 激光熔覆镍基合金温度场和应力场数值模拟[J]. 焊接学报，2015，36(5)：25-28.

[14] 张岩，丁金滨，石良臣，等. ANSYS Workbench 17.0 有

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2017:347-360.
[15] 孙承峰. 基于CCD激光熔覆成形过程在线监测与控制[D]. 苏州:苏州大学,2010.
[16] 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.
[17] 张国智. ANSYS10.0热力学有限元分析实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
[18] LALEH M,HUGHES A E,XU W,et al. On the unusual intergranular corrosion resistance of 316L stainless steel additively manufactured by selective laser melting[J]. Corrosion Science,2019,161:108189.
[19] 谭真,郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京:冶金工业出版社,1994:4-78.
[20] 李立碑,孙玉福. 金属材料物理性能手册[M]. 北京:机械工程出版社,2011:119-162.
[21] 刘喜明,关振中. 送粉激光熔覆工艺参数与熔覆层参数间的关系[J]. 金属热处理学报,1998,19(3):29-35.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net