

## 变倾角激光熔覆成形层高和层宽模型研究

李天奕<sup>1</sup>, 石拓<sup>1\*</sup>, 李宽<sup>2</sup>, 张荣伟<sup>2</sup>, 李建宾<sup>2</sup>, 孙业旺<sup>1</sup>, 刘广<sup>2</sup><sup>1</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;<sup>2</sup>苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 激光熔覆成形悬臂结构和大倾角强化修复需要在倾斜基面上沉积。现有工艺参数与熔覆层形貌数学模型的研究一般是基于水平基面开展的, 较少有人研究空间倾斜基面的倾角对成形形貌的影响。本文采用激光内送粉技术实现大倾角熔覆, 同时引入空间倾角作为影响熔覆层形貌的工艺参数。通过进行单道正交试验确定了每个倾角下的合适功率与速度区间并取交集, 确定了 $0^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 倾角、800~1200 W 激光功率、4~8 mm/s 扫描速度为目标模型输入参数的适用范围。在此范围内开展薄壁墙堆积实验, 同步利用 CCD 层高测量系统和定距提升闭环控制算法, 实时测量层高数据并控制提升量, 采用金相显微镜测量成形件的层宽数据。结果表明: 在相同的功率与扫描速度下, 层高随着倾角增大而先减后增, 倾角达到 $90^{\circ}$ 时层高最小; 层宽随着角度增大而先增后减, 倾角达到 $90^{\circ}$ 时层宽最大。利用获取的 250 组数据建立 BP 神经网络模型, 通过输入倾角等熔覆工艺参数, 能够实现对熔覆层高度和宽度的预测。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 光内送粉; 倾斜基面; 形貌控制; BP 神经网络

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220746

## 1 引言

激光熔覆成形(LCF)是一种同步送粉式新型金属增材制造技术, 可无模具直接成形零部件, 也可实现材料的表面强化与修复, 具有效率高、自由灵活、尺寸不受限、可沉积梯度材料等优势。然而, 与选择性激光熔化(SLM)技术相比, LCF 难以成形形状特征复杂的结构件, 例如航空发动机的机匣、涡轮叶片、燃烧室、火箭尾喷管等高附加值零部件, 这些零部件均具有大角度悬垂倾斜、多元扭曲等复杂结构特征<sup>[1]</sup>。在修复领域, 一些大型不便搬运翻转的零部件, 如轧机牌坊、大型模具、大型转子、军事装备等, 其缺损、腐蚀表面往往不是水平面, 而是空间任意基面。上述成形或修复任务需要 LCF 熔覆头朝空间倾斜基面进行熔覆沉积。

对于现有的倾斜基面上的大角度变姿态多层堆积成形而言, 熔池在重力的作用下往往会出现拉伸甚至移位流淌, 从而影响凝固后单道的截面高宽, 即影响熔覆成形层高与层宽的变化。较小的高宽变化会影响成形精度, 而较大的高宽变化, 特别是当实际层高变化与预设单层熔覆头提升量不一致时, 将直接影响成形质量和延续性。因此, 需要掌握 LCF 过程中不同基面倾角对单道高宽的影响规律。

利用 LCF 工艺参数与测得的激光熔覆层高或层

宽的关系, 人们对各种拟合方法与数学建模进行了研究。例如: Davim 等<sup>[2]</sup>采用二次回归算法分析了熔覆层高度和宽度、湿润角与工艺参数之间的关系; 东南大学的王鹏飞等<sup>[3]</sup>通过平面正交试验与仿真研究了一种镍基合金成形时熔覆层前沿坡角与基体倾斜角度之间的关系; 青岛理工大学的梁万旭等<sup>[4]</sup>利用响应面法探究了不同工艺参数相互耦合作用对熔覆层形貌的影响; 陕西理工大学的王燕燕等<sup>[5]</sup>利用响应面法结合第二代非支配遗传算法建立了输入工艺参数与成形指标间的代理模型, 并提出了输入工艺参数的优化方法。近年来, 神经网络模型越来越多地被运用到 LCF 领域, 例如: 中国科学院的姜淑娟等<sup>[6]</sup>运用 BP 神经网络建立了熔覆高度预测模型; 苏州大学的庞伟帆等<sup>[7]</sup>采用 BP 神经网络和响应面法以粉末沉积率为输出建立了两种模型, 并比较了两种模型的可靠性与泛化能力; 黄小伟等<sup>[8]</sup>探讨了组合工艺参数对熔覆层截面形貌的影响, 并通过线性相关法研究了各工艺参数与熔覆层形貌之间的关系。

目前, 研究人员大多选择激光功率、扫描速度、送粉率等参数作为单道高宽模型的输入。现有多路会聚送粉喷头或环形送粉喷头均基于“光外送粉”的原理进行工作, 空间加工倾角一般不超过 $45^{\circ}$ , 难以开展角度对熔覆层形貌影响的实验, 因此, 大多数研究在水平面

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-19; 录用日期: 2022-07-08; 网络首发日期: 2022-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(61903268, 62173239)、江苏省自然科学基金(BK20190823)

通信作者: \*shituo@suda.edu.cn

基板上进行单层单道实验来采集数据。然而,底层基板上成形的单道与向上堆积后的多层单道形貌往往存在很大差别。出现这种情况的原因有两点:1) 在堆积过程中存在“热累积”现象,第一层熔池可以通过三维传热将热量传导给基体,而多层单道熔覆时基材则从初始的基板变为已成形的熔覆层,表面积小于基板,散热速度减缓,导致熔池尺寸变化。当基板与粉末材料不同时这种现象更为明显。2) 单道表面一般呈弧形,在多层单道成形过程中,粉末会优先将上一层单道的表面填补平整,因此新成形单道表面弧线的曲率要小于第一层单道,这使得测得的层高数据往往差距较大<sup>[9]</sup>。如图 1 所示,采用相同的参数进行薄壁墙堆积与单道扫描,多层单道与平面单道的弧线曲率、截面高宽差别明显。

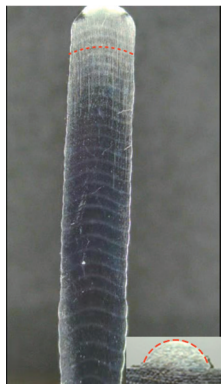


图 1 相同工艺参数下多层单道与平面单道截面形貌的对比  
Fig. 1 Comparison of single-track section in a single-layer and multi-layers

LCF 工艺一般沿用 3D 打印层层堆积的基本原理,每层的 Z 轴提升量不变。提升量的值一般由基板上的单道实验数据设定。在逐渐堆高后,如果多层层高与预设提升量不一致,易产生离焦,导致堆积失败,同时层宽也无法控制。因此,通过单道实验数据所确定的工艺参数,在堆积层数增加后,预测值与实际单道高宽的误差将越来越大。

为解决上述问题,本课题组设计了薄壁墙堆积实验,采集不同基面倾角下多层单道的层高和层宽数据,分析空间倾角对层高和层宽的影响,同时建立 BP 神经网络预测模型,为 LCF 大倾角基面工况下保持单道层高和层宽的一致性从而实现高精度成形提供了一种新方法。

## 2 实验材料与设计

### 2.1 实验材料

实验所用基体材料为 45 钢,成形粉末材料为 F314 铁基合金粉末。粉末粒径为 45~109  $\mu\text{m}$ ,化学成分如表 1 所示。

### 2.2 实验设备

本文激光熔覆成形系统的运动机构为六轴

表 1 F314 铁基合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of F314 iron-based alloy powder

Element	Mass fraction/%
Fe	Bal.
C	0.1
Cr	15.0
B	1.0
Si	1.0
Ni	1.0

KUKA 机器人,其装载有本课题组自主研发的中空光内送粉熔覆喷头<sup>[10]</sup>。该熔覆喷头的工作原理如图 2 所示。此外,激光熔覆成形系统还配置有 2000 W IPG 激光器、GTV PF2/2 送粉器、自研闭环层高控制系统。实验过程中采用氮气作为保护气体和送粉载气。

光内送粉喷头为中空环形“光包粉”耦合结构。在图 2 中,准直后的平行激光束经圆锥反射镜和环形反射镜后得到中空环形聚焦光束。送粉管与准直气管安装于中空区域的中轴线上,粉管外围的环形准直气可对粉末产生集束作用。当喷头朝倾斜方向喷射时,通过调节准直气与送粉载气的压强,就可以显著降低熔覆过程中大角度下重力对粉束的影响,保证喷射精度<sup>[11]</sup>。

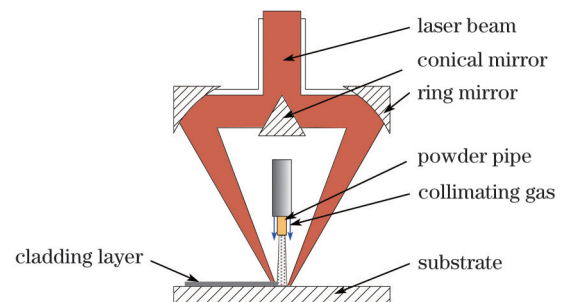


图 2 中空环形光内送粉原理

Fig. 2 Principle of powder feeding in annular laser beam

本课题组搭建的闭环层高控制系统的结构如图 3 所示。CCD 相机采用 Basler acA 系列,并固定在喷头上,可与喷头同步移动或转动。基于工控机平台开发了层高视觉测量软件,该软件计算得出的堆高  $h$  等熔池信息被输入到机器人控制柜。西门子可编程逻辑控制器(PLC)作为 ProfiNet 通信模块。

熔覆头堆积每层后的 Z 轴提升量不是预设值,而是与当前该层测得的实际堆高相等。以第  $k$  层堆积为例,熔覆过程中实时测量、计算高度,在该层堆积完成后计算出平均高度  $H(k)$ 。在进行第  $k+1$  层堆积前,喷头在堆积方向上依据计算所得的平均层高  $H(k)$  进行移动,在竖直堆积情况下,Z 轴方向提升  $Z(k)$ ,此时  $Z(k)=H(k)$ 。在变倾角薄壁墙堆积实验中,由于薄壁墙沿 X 轴扫描堆积,因此在实际提升过程中应依据当前熔覆头倾斜角将提升量  $H(k)$  分解到 Z 轴与 Y 轴,实

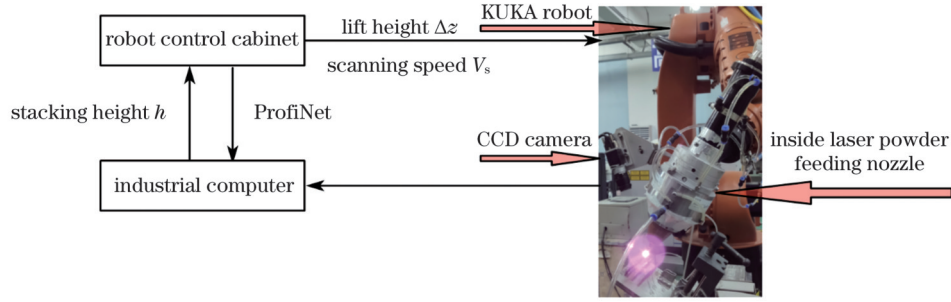


图 3 闭环层高控制系统结构示意图

Fig. 3 Structural representation of closed-loop control of cladding height system

现提升并确保熔覆过程中离焦量始终不变。

### 2.3 实验目标

激光熔覆成形过程中的熔池熔凝与对流是一个复杂的物理化学过程。在现有研究中,大多数模型往往选取扫描速度( $V_s$ )、激光功率( $P$ )、离焦量( $D$ )这三个对熔覆层形貌有显著影响的工艺参数作为模型的输入<sup>[12-13]</sup>。由于需要在不同角度下进行薄壁墙堆积实验,本文引入了角度变量( $\theta$ )作为模型输入。同时,若离焦量的变化过大,易导致薄壁墙堆积失败,进而影响 CCD 层高系统数据获取的可靠性。因此,选取扫描速度、激光功率、角度作为模型的输入变量,同时以薄壁墙各层的高度和宽度( $H$ 和 $W$ )作为衡量形貌的输出指标。本文预建立的模型表述为

$$y=[W, H]=f(P, V_s, \theta) \quad (1)$$

### 2.4 单因素实验设计

本研究期望建立一个涵盖功率、扫描速度等过程输入参数及基面角度与成形件层高、层宽关系的数学模型。熔池的自由界面可以看成是一条椭圆曲线,由 Ashan 等的模型分析<sup>[14]</sup>可以得到熔池流淌过程中熔池在不同高度 $z$ 处的位移量 $x(z)$ 为

$$x(z)=\frac{D}{V_s \cdot \mu} \left( \rho_L \cdot g \cdot \frac{z^2}{2} \cdot \sin \theta - F_1 \cdot D_{Ts} \cdot z \right) \quad (2)$$

式中: $\mu$ 为动力黏度; $\rho_L$ 为液态金属的密度; $g$ 为重力加速度; $z$ 为熔覆单道的高度; $F_1 \cdot D_{Ts}$ 为熔池表面张力分量。可以看出熔池在重力 $G$ 方向上的位移与激光光斑直径 $D$ 、熔覆单道的高度 $z=h_{max}$ 、基板的倾斜角度 $\theta$ 成正比,与激光扫描速度 $V_s$ 、动力黏度 $\mu$ 成反比。当速度 $V_s$ 较大时, $x(z)$ 较小,即流淌现象不明显。在实验中,扫描速度设定在 8 mm/s 以下,角度以 30°步长从 0°变化至 180°。在各个角度下进行单道单因素影响实验。以激光功率、扫描速度为变量,其中的一个参数固定并设定先验值参数,以另一个参数为可变参数(在预先设定的范围内进行调节),进行 50 mm 长的单道熔覆。将无法形成表面光亮饱满、整体形貌均匀的单道参数数值作为该参数一侧的极限点。实际实验中由于高速单道成形受角度的影响相对较小,所以在角度固定的情况下可调节参数的先验实验均从速度相对较高的 8 mm/s 条件下开始,扫描只需沿单一方向进行。激光

功率作为可变参数时,从 1000 W 开始向两个方向搜索极限值。

最后得到每个角度下的功率区间及扫描速度区间,如表 2 和表 3 所示,再对各个区间取交集即可得到所建模型的约束条件。考虑到大角度下的功率窗口较小,所以薄壁墙堆积实验角度区间调整为 0°~135°,步长为 15°。相应地,功率区间确定为 800~1200 W,速度区间为 4~8 mm/s。

表 2 激光功率单因素实验表

Table 2 Single factor experiment table of laser power

Angle / (°)	Fixed scanning speed $V_s / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Processing window of laser power $P / \text{W}$
0	8	[600, 1600]
30	8	[600, 1600]
60	8	[750, 1500]
90	8	[800, 1500]
120	8	[800, 1400]
150	8	[800, 1200]
180	8	[800, 900]

表 3 扫描速度单因素实验表

Table 3 Single factor experiment table of scanning speed

Angle/(°)	Fixed power $P / \text{W}$	Processing window of scanning speed $V_s / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
0	800	[3.5, 8]
30	800	[3.5, 8]
60	800	[3.5, 8]
90	800	[3.5, 8]
120	800	[3.5, 8]
150	800	[4, 8]
180	800	[6.5, 8]

### 2.5 变角度薄壁墙堆积实验设计

数据量对于模型的预测精度、泛化能力都有着决定性影响。本文采用变角度薄壁墙实验,结合 CCD 视觉层高测量系统来保证模型的预测精度和泛化能力。以堆积薄壁墙取代单道实验,不仅可以缩减参数调整时间,还可以获取多层堆积时各单道截面的高宽数据。复杂零部件的 3D 打印一般为多层堆积,这样获取的多层单道的形貌数据较基体上单道的形貌数据更为准



确。实验在  $0^{\circ}\sim 135^{\circ}$  之间的 10 个角度下进行, 每个角度下进行 5 组薄壁墙堆积, 分别设定功率为 800、900、1000、1100、1200 W。一共进行 50 组薄壁墙堆积实验,

薄壁墙长度均为 50 mm 且每组薄壁墙共 30 层, 每 6 层进行一次数据变化, 速度由 4 mm/s 逐渐增至 8 mm/s, 步长为 1 mm/s。实验过程如图 4 所示。

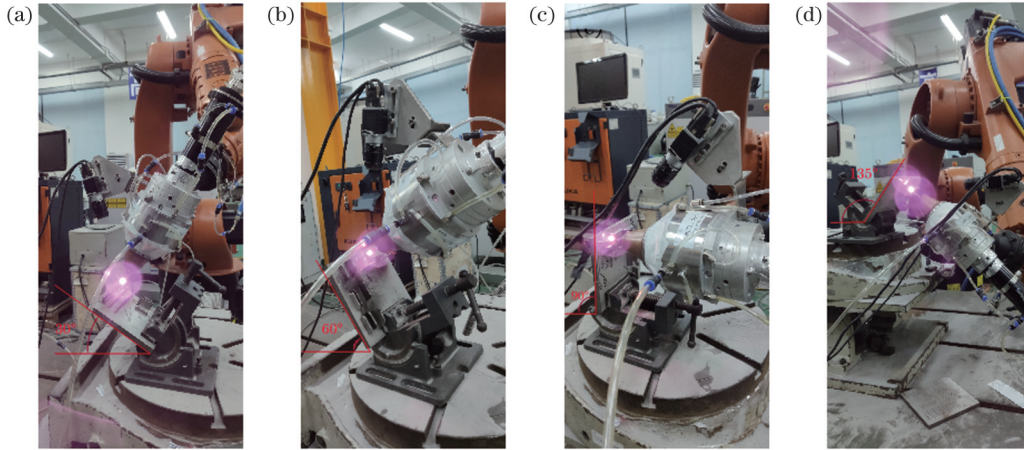


图 4 变角度薄壁墙堆积实验。(a)  $30^{\circ}$ ; (b)  $60^{\circ}$ ; (c)  $90^{\circ}$ ; (d)  $135^{\circ}$

Fig. 4 Variable angle thin wall deposition experiment. (a)  $30^{\circ}$ ; (b)  $60^{\circ}$ ; (c)  $90^{\circ}$ ; (d)  $135^{\circ}$

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 变角度薄壁墙堆积实验结果

依照实验设计, 熔覆成形了 50 组薄壁墙, 部分成形效果如图 5 所示。

实验过程中, 闭环层高控制系统所测层高数值为每层层高的平均值, 测量结果中层高基本随扫描速度的增加呈阶梯振荡下降趋势。以  $0^{\circ}$ 、1000 W 参数下的一组薄壁墙为例, 自动测量的每层单道的高度变化如图 6(a) 所示, 成形后薄壁墙切片的截面如图 6(b) 所示。

由图 6 可以看出, 当扫描速度阶跃变化时, 前 2~3 层的层高存在振荡。因此, 取每 6 层中的后 3 层的均值作为得到的层高输出。层宽数据通过金相显微镜观察图 6(b) 所示薄壁墙剖面图结合 AutoCAD 软件的测量模块获得。 $90^{\circ}$  向后进行堆积的薄壁墙在高功率下出现了尾端塌陷, 因此, 也采用金相显微镜结合 AutoCAD 软件测量模块对塌陷的薄壁墙进行了测量。

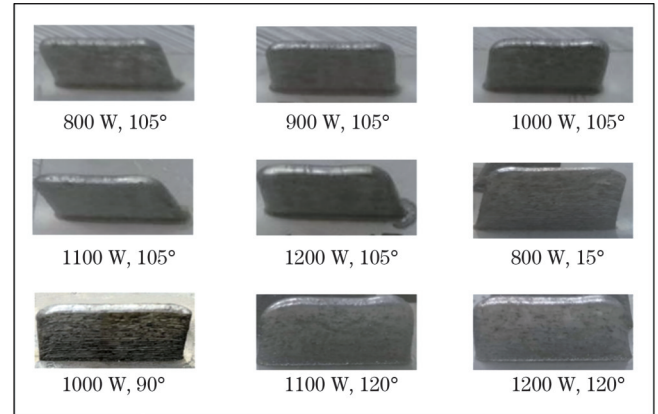


图 5 部分同角度下的成形效果对比

Fig. 5 Comparison of forming effect at the same inclination angle (partially)

#### 3.2 数据分析

测量获得的 250 组沉积层高度和宽度数据如图 7 和图 8 所示。分析采集得到的层高和层宽数据可以得

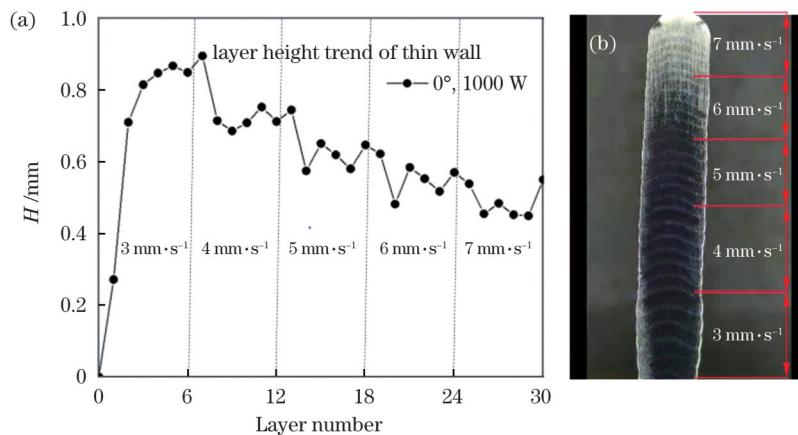


图 6 层高控制系统测量数据的变化趋势。(a) 薄壁墙堆积层高趋势图; (b) 薄壁墙剖面图

Fig. 6 Trend of measurement data by layer height control system. (a) Trend of thin wall layer height; (b) cross section of thin wall

出:在其他输入参数不变的情况下,层高受角度的影响较大,而层宽受角度的影响较小。可将熔池的边界曲线近似为椭圆曲线<sup>[15-16]</sup>,椭圆曲线的短半轴决定了层高的大小,而长轴则决定了层宽的大小。在熔覆倾角从0°变化至90°过程中,熔池受重力影响而拉伸,熔池宽度逐渐增大,且熔覆层生长方向与重力的夹角逐渐增大,熔池椭圆边界曲线的短半轴随之减小,因此层高

逐渐减小,并在倾角为90°时达到最小;在倾角由90°变化至135°过程中,虽然重力对熔池的影响没有发生变化,但熔覆层生长方向与重力之间的夹角减小,重力的影响反而使得层高增大。整体上,层宽受倾角影响的变化趋势与层高正好相反,即:层宽先随着倾角的增大而增大,倾角为90°时达到最大,在90°~135°之间层宽又逐渐减小。

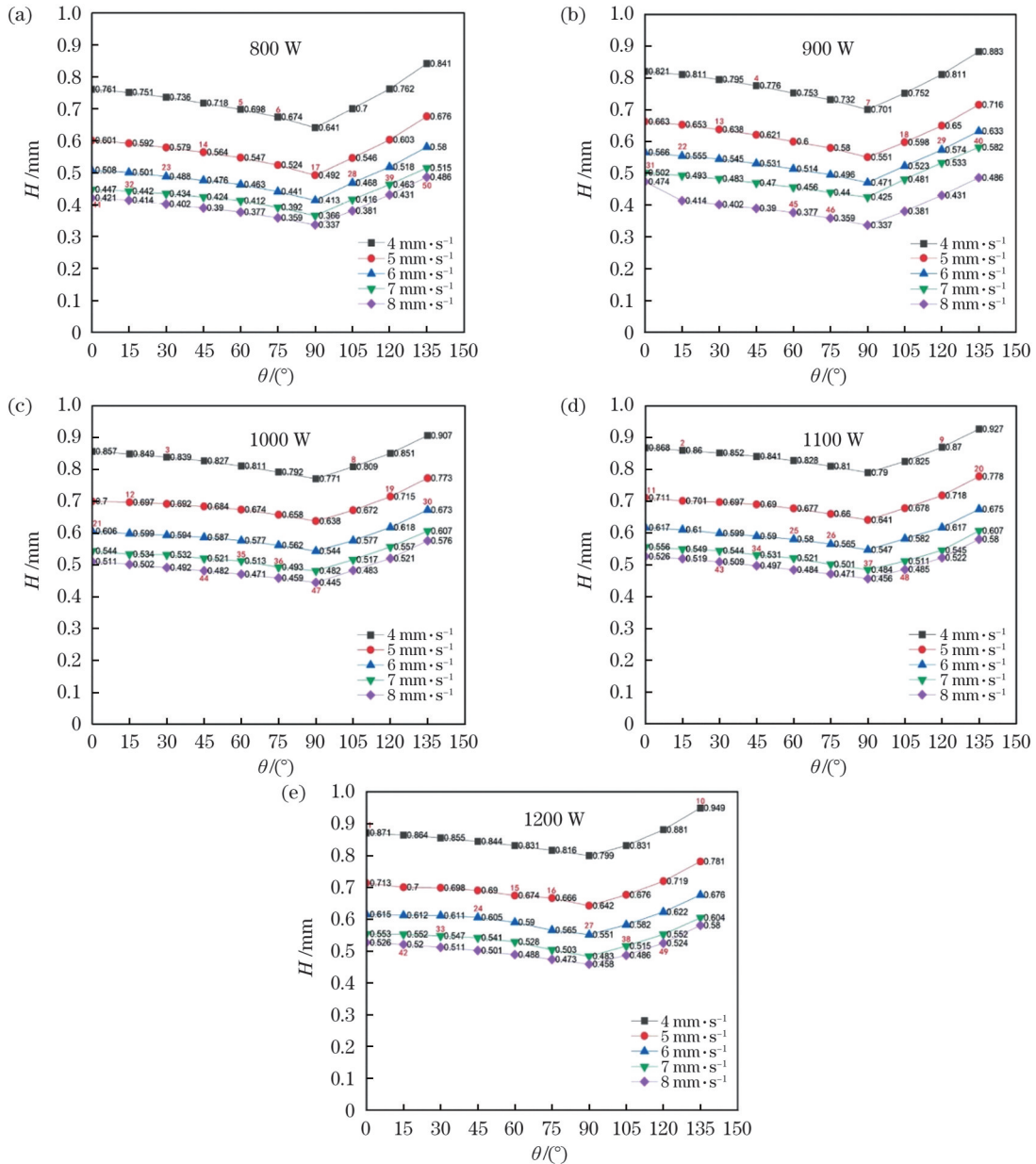


图7 测量的熔覆层高度随工艺参数的变化

Fig. 7 Variation of measured cladding layer height with process parameters

依据所得到的实验数据与剖面图片进行横向与纵向分析,即固定其中任意一至两个输入,探讨剩余的输入与输出(层高和层宽)的关系,可以得出以下6条结论:

- 1) 角度和功率相同时,扫描速度越快,层高和层宽数值越小;
- 2) 角度和扫描速度相同时,功率越大,层高越大,但饱和后几乎不变,甚至减小;

3) 功率与扫描速度对层宽的影响不大,相对而言,速度越快,层宽越小;

4) 扫描速度和功率相同时,随着角度增大,层高先减小后增大,层宽则先增大后减小,当角度达到90°时层高最小而层宽最大;

5) 扫描速度相同时,功率越大,角度对层高的影响越小;

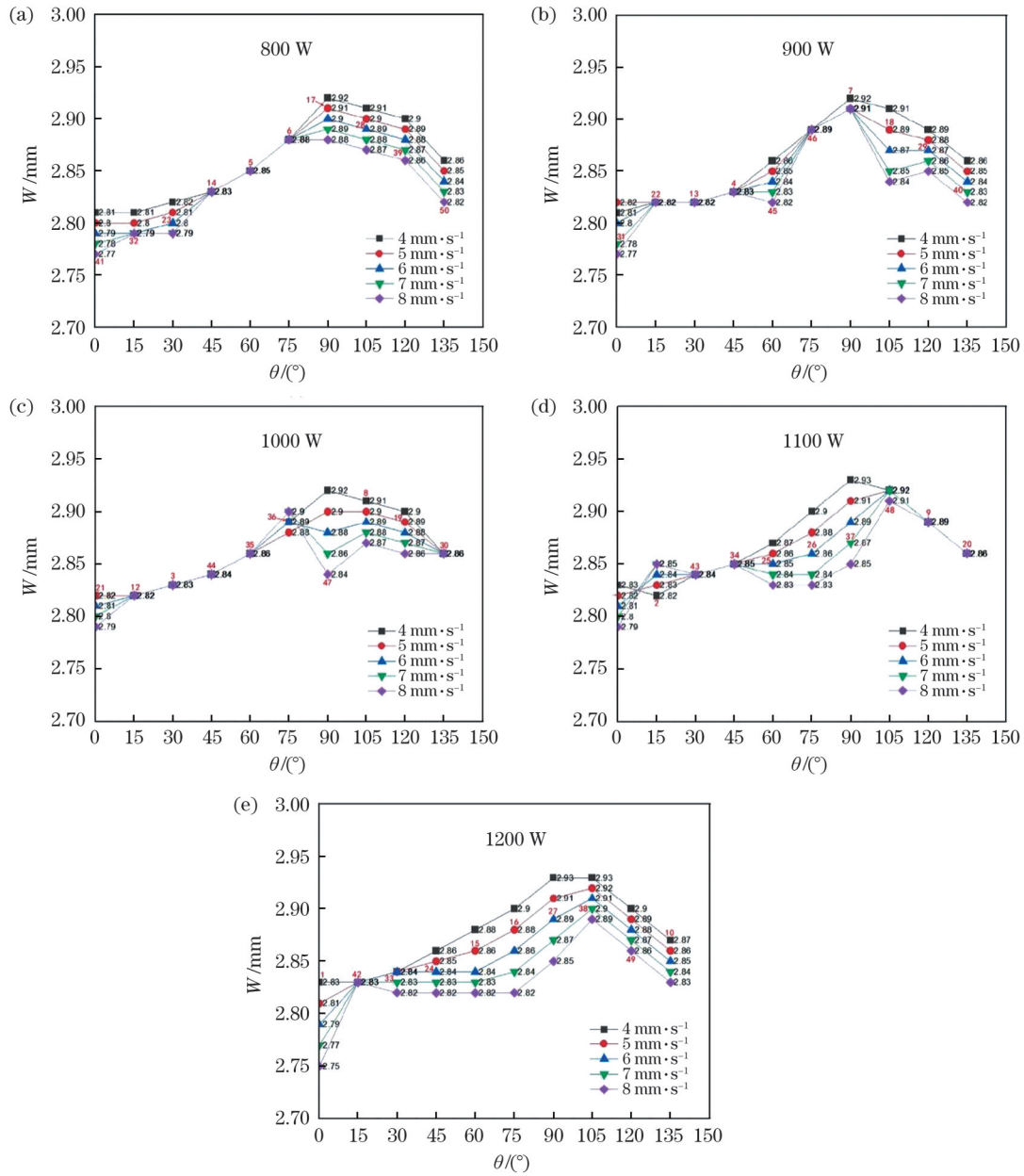


图 8 测量的熔覆层宽度随工艺参数的变化

Fig. 8 Variation of measured cladding layer width with process parameters

6) 在相同的功率下,扫描速度越大,角度对层高的影响越小。

#### 4 神经网络模型的建立

BP神经网络模型能够很好地同时处理多个输入数据拟合的问题,有着优秀的非线性映射能力与泛化能力,其缺点在于建模需要的数据量较大。为了提高模型的准确性,本课题组最终采集了熔覆层高宽数据各 250 组。

BP神经网络由输入层、隐含层、输出层三部分构成。图 9 是本文所建立的 BP 神经网络的拓扑结构图。3 个输入参数为角度、功率和扫描速度,输出参数为图 7 和图 8 中的 250 组测量数据,因此输入层为  $250 \times 3$  矩阵。输出量有 2 个,分别为熔覆层的高度与宽度。为使神经网络可以快速收敛,采用两个输入与结构完全

相同的神经网络对两个输出量分别进行预测,故两个神经网络的输出均为  $250 \times 1$  矩阵。隐含层部分的层数、神经元个数与学习率等需要通过调参确定<sup>[17-18]</sup>,连接权值由误差沿梯度负方向传播调整。

此外,对图 7 与图 8 中的数据点依照自上而下和从左向右的顺序进行编号,不同功率下数据点的编号为 1~50。实际建模过程中取出每幅图中用红色编号标出的数据点建立数据集,例如取图 7(a)中编号为 5、6、14、17、23、28、32、39、41、50 的数据建立数据集,最终共抽取了层高和层宽各 50 组数据作为测试集,剩余的数据作为训练集。这样测试集中包含了各种角度、功率、速度信息,增强了测试集的全面性。模型仅由训练集建立,测试集仅用于测试模型的预测能力以及评价模型的泛化能力。测试集初始不用于训练,仅用于调参训



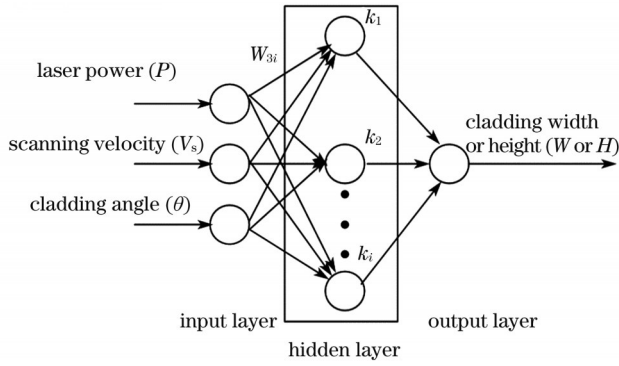


图 9 BP 神经网络拓扑结构图  
Fig. 9 BP neural network topology

练后的测试,直至训练集训练的神经网络可在 90% 置信度下预测出测试集数据。然后利用所有的数据训练完成调参的神经网络模型,更新网络内部的各权值与阈值。最终基于训练集得到的神经网络对测试集的预测效果如图 10 所示,其中图 10(a)为熔覆层宽度的预测效果,图 10(b)为熔覆层高度的预测效果。最终获得的层高和层宽预测神经网络参数如表 4 所示。

以均方根误差 RMSE、90% 置信度预测的准确率  $A_{90\%}$  作为模型预测准确率与泛化能力的评价指标。二者的定义为

表 4 变角度熔覆高度和宽度神经网络参数表  
Table 4 Neural network parameter of angle-varied cladding height and width

Network parameter	Width-BP	Height-BP
Learning rate	0.1	0.1
Maximum number of iterations	5000	5000
Training target error	0.01	0.01
The number of hidden neurons	4	4
Nodes of each hidden neurons	[6, 10, 10, 6]	[6, 10, 10, 6]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (\hat{y}_j^{(i)} - y_j^{(i)})^2}{n}}, 0 \leq i \leq n, j = 1, 2, (3)$$

$$A_{90\%} = \frac{\sum_i C_j^{(i)}}{n} \times 100\%, 0 \leq i \leq n, j = 1, 2, (4)$$

其中,

$$C_j^{(i)} = \begin{cases} 1, & \text{if } |\hat{y}_j^{(i)} - y_j^{(i)}| \leq 10\% y_j^{(i)}, 0 \leq i \leq n, j = 1, 2, \\ 0, & \text{else} \end{cases} (5)$$

式中:  $\hat{y}_j^{(i)}$  为第  $i$  个样本的第  $j$  个指标的预测值,  $j=1$  对应熔覆层高度,  $j=2$  对应熔覆层宽度;  $y_j^{(i)}$  对应样本的实际值;  $n$  为样本总数。图 11 给出了基于 250 组数据

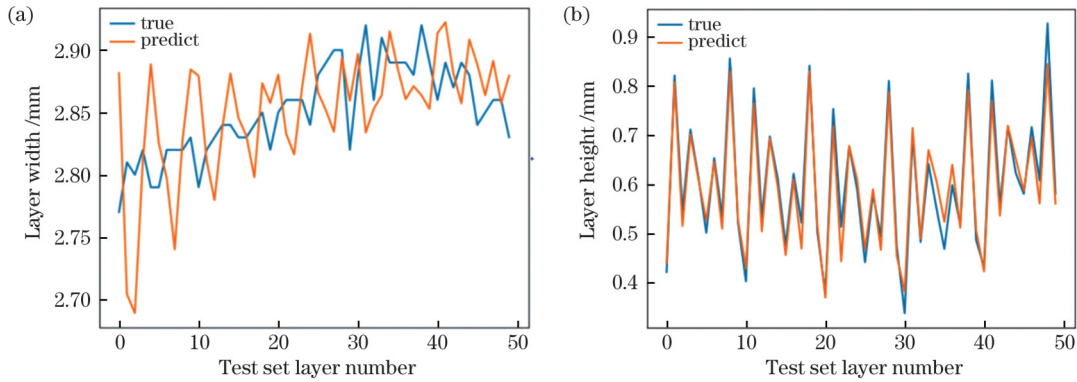


图 10 测试集的预测结果。(a)层宽的预测结果;(b)层高的预测结果  
Fig. 10 Prediction result of test set. (a) Prediction result of layer width; (b) prediction result of layer height

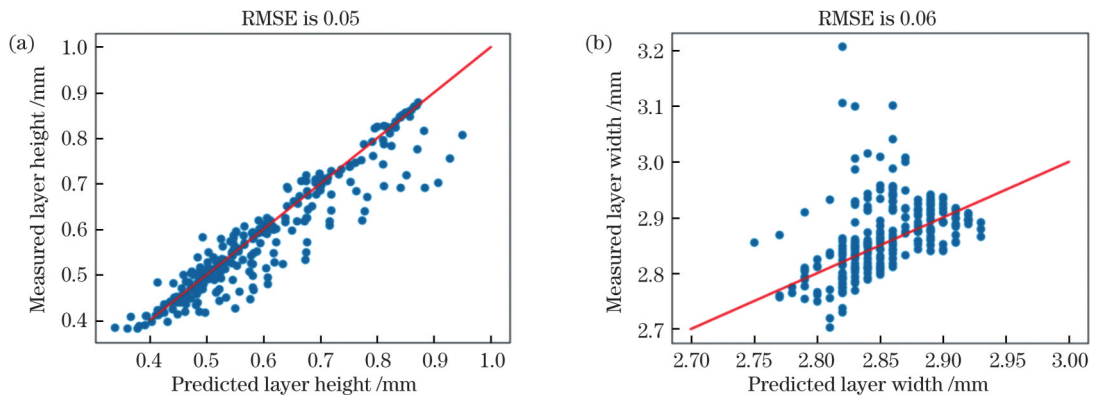


图 11 熔覆层高度和宽度模型的预测效果。(a)层高预测方差;(b)层宽预测方差  
Fig. 11 Prediction effect of cladding layer height and width models. (a) Layer height prediction variance; (b) layer width prediction variance

训练最终得到的高度预测模型与宽度预测模型的 RMSE 计算结果。可以看到最终两个神经网络预测模型的均方根误差均控制在 0.1 以下, 90% 置信度预测的准确率  $A_{90\%}$  分别为 99% 与 96%。这一结果证明通过 BP 神经网络方法建立的涵盖角度变量的熔覆层高度和宽度预测模型是可靠的。

## 5 结 论

本课题组利用光内送粉技术空间自由灵活、可实现大倾角熔覆的特点, 研究了空间倾角对熔覆层高度和宽度的影响规律。通过实验定量地验证了熔池在不同倾角下受重力影响的截面形貌差异, 即熔池在重力作用下会发生拉伸及移位流淌, 从而影响凝固后单道的截面高宽变化。得到的主要结论如下:

1) 采用 CCD 视觉层高测量装置与自动定距提升策略测量薄壁墙层高, 保证了离焦量不变。提出并实现了一种自动测量获取不同参数下层高数据的方法, 相比传统的手工测量方法, 该方法可以快速高效地采集大量数据, 从而提高 BP 神经网络模型的泛化能力; 通过变角度堆积减小了由传统单道实验数据所建立的模型在堆积层数增加后预测值与实际单道高宽之间的误差。

2) 在突破光外送粉空间加工倾角  $45^\circ$  局限的基础上, 开展了  $0^\circ \sim 135^\circ$  变角度熔覆对单道形貌影响的研究。结果表明, 在其他输入参数不变的情况下, 层高受角度的影响较大, 而层宽受角度的影响较小。在  $0^\circ \sim 135^\circ$  范围内以  $90^\circ$  为界, 层高随角度的增大呈先减后增的趋势, 而层宽整体上先增后减。

3) 设计了 BP 神经网络非线性模型。用 250 组数据进行训练最终得到的高度和宽度预测模型的 RMSE 计算结果显示, 层高和层宽神经网络预测模型的均方根误差均控制在 0.1 以下, 90% 置信度预测的准确率分别为 99% 与 96%。在多层单道成形过程中, 粉末与能量会优先将上一层单道的表面填补平整, 因此, 新成形单道表面弧线的曲率小于第一层单道, 干扰了层高的传感监测。本文建立的神经网络模型补偿了层高监测系统的数据误差。

本研究为进一步优化设计层高和层宽闭环控制系统打下了基础, 所建立的模型可以作为闭环控制系统的预测器, 在大倾角悬臂结构成形过程中及时调整参数, 保持层高和层宽不变, 实现复杂结构零部件的高精度成形。

## 参 考 文 献

- [1] 孙培锋, 蒋志强. 燃气轮机在热电联产工程中的应用状况分析[J]. 能源研究与信息, 2013, 29(1): 6-10.  
Sun P F, Jiang Z Q. Analysis of the application of gas turbines in heat and power cogeneration projects[J]. Energy Research and Information, 2013, 29(1): 6-10.
- [2] Davim J P, Oliveira C, Cardoso A. Predicting the geometric form of clad in laser cladding by powder using multiple regression analysis (MRA)[J]. Materials & Design, 2008, 29(2): 554-557.
- [3] 王鹏飞, 杨坤, 陈明智, 等. 倾斜基板激光熔覆 GH3536 熔池形貌的仿真与实验研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002121.  
Wang P F, Yang K, Chen M Z, et al. Simulation and experimental research on the GH3536 molten pool laser cladding on inclined substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002121.
- [4] 梁万旭, 杨勇, 金康, 等. 基于响应面法的同轴送粉多道激光熔覆层形貌预测[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 0114012.  
Liang W X, Yang Y, Jin K, et al. Morphology prediction of coaxial powder feeding multichannel laser cladding layer based on response surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0114012.
- [5] 王燕燕, 李家豪, 舒林森, 等. 基于 RSM 与 NSGA-II 算法的激光熔覆参数多目标优化[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0714004.  
Wang Y Y, Li J H, Shu L S, et al. Multi-objective optimization of laser cladding parameters based on RSM and NSGA-II algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0714004.
- [6] 姜淑娟, 刘伟军, 南亮亮. 基于神经网络的激光熔覆高度预测[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 269-274, 281.  
Jiang S J, Liu W J, Nan L L. Laser cladding height prediction based on neural network[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 269-274, 281.
- [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] 黄小伟, 刁俊通, Lebrun J L, 等. 工艺参数对激光熔覆成形 316L 不锈钢形状的影响规律[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 0714004.  
Huang X W, Xi J T, Lebrun J L, et al. Influences of processing parameters on geometric characterizations of laser cladding forming 316L stainless steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 0714004.
- [9] 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属制造薄壁零件 z 轴单层行程模型[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 57-60, 115.  
Zhu G X, Zhang A F, Li D C, et al. Model of layer thickness of thin-walled parts in laser metal direct manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 57-60, 115.
- [10] 石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: CN101148760[P]. 2008-03-26.  
Shi S H, Fu G Y, Wang A J, et al. Technique for manufacturing inner-light powder-supplying by laser machining forming and inner-light powder-supplying spray head: CN101148760[P]. 2008-03-26.
- [11] 史建军, 石拓, 石世宏, 等. 激光光内送粉仰面熔覆工艺研究及优化[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3): 108-115.  
Shi J J, Shi T, Shi S H, et al. Process study and optimization of upward cladding by laser inside powder feeding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(3): 108-115.
- [12] 蒋伟伟. 三分光束光内同轴送丝工艺研究及扭曲薄壁件成形[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.  
Jiang W W. Research on the technology of coaxial wire feeding in three beam splitting and the forming of twisted thin-wall parts[D]. Suzhou: Soochow University, 2020.
- [13] 刘立君, 姜亚青, 王晓鹏, 等. 激光熔覆参数 BP 神经网络的反求[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(3): 112-116.  
Liu L J, Jiang Y Q, Wang X P, et al. Inverse solution of BP neural network for laser remelting parameters[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(3): 112-116.
- [14] Kumar A, Paul C P, Pathak A K, et al. A finer modeling approach for numerically predicting single track geometry in two dimensions during laser rapid manufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(3): 555-565.
- [15] 陆斌, 朱刚贤, 吴继璋, 等. 基于光内送粉激光变斑直接成形薄壁叶片的工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203003.  
Lu B, Zhu G X, Wu J Z, et al. Laser direct forming process of



- thin-walled blade using variable spot by inside-beam powder feeding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1203003.
- [16] 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.
- [17] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016. Zhou Z H. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [18] 温海骏, 孟小玲, 许向川, 等. 基于神经网络和遗传算法的激光熔覆工艺参数多目标优化[J]. 应用激光, 2019, 39(5): 734-740. Wen H J, Meng X L, Xu X C, et al. Multi-objective optimization of laser cladding process parameters based on neural network and genetic algorithm[J]. Applied Laser, 2019, 39(5): 734-740.

## Height and Width Model of Cladding Layer Formed by Laser Cladding with Variable Angle

Li Tianyi<sup>1</sup>, Shi Tuo<sup>1\*</sup>, Li Kuan<sup>2</sup>, Zhang Rongwei<sup>2</sup>, Li Jianbin<sup>2</sup>, Sun Yewang<sup>1</sup>, Liu Guang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, Jiangsu, China

### Abstract

**Objective** The fabrication of an overhang or large inclination structure with laser cladding must be completed on an inclined substrate. Regarding the parameters and morphology of laser cladding layer, previous studies have mainly been conducted on a horizontal base plane. Few studies have focused on the influence of different inclination angles of the base plane on forming morphology. The molten pool is often stretched or even displaced by gravity when conducting multilayer deposition with a large inclination, which affects the height and width of the single pass after solidification. A slight change in the height and width can affect the final forming accuracy; whereas, large changes in the height and width, particularly when the actual layer height is inconsistent with the preset layer height, will directly affect the forming quality and continuity. Therefore, this study explores the influence of different base plane inclinations on the height and width of a single track, and uses the base plane inclination as one of the inputs to establish a neural network prediction model.

**Methods** First, a single-factor experiment method was used to scan a single layer to determine the working range of each process parameter and the change step of the parameters. The laser power was varied from 800 to 1200 W in steps of 100 W. The scanning speed was varied from 4 to 8 mm/s in steps of 1 mm/s. The angle was varied from 0° to 135° at the step rate of 15°. Thin-wall deposition experiments were then carried out at 10 selected angles, and five groups of deposition with different power parameters at each angle were considered. Each group of thin wall was deposited with 30 layers, and the process included five groups of selected scanning speeds, which was changed every six layers. A CCD layer height measurement system was used to collect layer height data in real time during the deposition process of the thin wall.

**Results and Discussions** The thin wall was cut from the middle, and the width of each layer of the cut section was measured. The mean values of the last three layers of every six layers in the measured layer height data are valid (Fig. 6). Finally, 250 sets of height and width data were obtained. Based on this data (Figs. 7 and 8), a BP neural network prediction model was established. The model considers the inclination of the cladding base plane, scanning speed, and power as the input, and the height and width of the cladding layer as the output. The data containing various angles, power, and speed information were regarded as the training set to enhance the comprehensiveness of the test set. The model was built using only the training set, and the remaining data were used as the test set. The test set was only used to test the predictive ability of the model and evaluate its generalization ability.

**Conclusions** The influence of variable angle cladding of 0°–135° on the single-pass morphology was studied. The experimental results show that the layer height first decreases and then increases with the change in the inclination angle, and that at 90° yields the lowest layer height, which can be attributed to the constant change in the angle between the gravity direction and the growth direction. The layer width first increases and then decreases with the angle change, reaching the highest value at 90°. The root mean square error of the two established neural network prediction models is controlled below 0.1, and the 90% confidence prediction accuracy  $A_{90\%}$  is 99% and 96%, respectively (Fig. 11), showing an excellent prediction effect of the established model.

**Key words** laser technique; laser cladding; inside-beam powder feeding; inclined plane; morphology control; BP neuronal network