

斜面多道熔覆涂层平整度的数值模拟与试验研究

练国富*, 李益, 褚梦雅, 陈昌荣, 黄旭, 冯美艳

(福建理工大学 a.机械与汽车工程学院 b.福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福州 350118)

摘要: **目的** 揭示扫描方式、基材倾角、搭接率对斜面熔池成形的影响规律, 提高斜面多道搭接涂层的平整度。**方法** 采用数值模拟探究激光扫描方式、基材倾斜角度、搭接率对倾斜基材表面熔覆涂层平整度的影响机理, 并结合正交试验进行验证。**结果** 模拟所得平整度随扫描方式、倾斜角度、搭接率变化规律与试验一致。激光扫描方式对水平基材的多道搭接平整度无明显影响, 但对倾斜基材表面的多道平整度影响显著。相同扫描方式下, 不同倾斜角度的基材适应的搭接率不同。**结论** 相比其他扫描方式, 扫描方式 1 (SM1) 和扫描方式 5 (SM5) 得到的熔覆层平整度和熔覆效率相对较高。平整度和熔覆效率随基材倾斜角度的增大而逐渐减小。以扫描方式 5 进行熔覆时, 水平基材最佳搭接率为 30%, 基材倾斜 40° 时最合适的搭接率为 15%~20%。显然, 倾斜角度和搭接率的交互作用对平整度影响显著。

关键词: 激光熔覆; 倾斜基材; 数值模拟; 扫描方式; 熔池演变; 平整度

中图分类号: V261.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)05-0126-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.05.013

Numerical Simulations and Experimental Research on Flatness of Inclined Multi-channel Cladding Coatings

LIAN Guofu*, LI Yi, CHU Mengya, CHEN Changrong, HUANG Xu, FENG Meiyuan

(a. School of Mechanical and Automotive Engineering, b. Fujian Key Laboratory of Intelligent Machining Technology and Equipment, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

ABSTRACT: Some high-strength structural parts have inclined shapes, such as gears, racks, and impellers. Nickel-based coatings are coated on the surface by laser cladding technology, which improves the mechanical surface performance and extends the service life of the parts. Regarding the geometric characteristics of inclined-matrix coatings, existing literature studies the deflection angles of nozzles, inclination angles of substrates, laser scanning methods, and overlapping ratios. Moreover, existing laser scanning methods include up-to-bottom, bottom-to-up, and horizontal continuous scanning for experimental comparative research.

Numerical simulations and experimental research were combined. Adjacent or interval scanning was conducted based on the constant working height between the nozzle and the substrate to explore the effects of different laser scanning methods and overlapping ratios on the surface flatness of inclined cladding coatings. In simulations and tests, Ni35A (1×10^{-4} m) powders and 45° steel substrates were used to study inclined heat source derivation, model verification,

收稿日期: 2022-12-17; 修订日期: 2023-06-08

Received: 2022-12-17; Revised: 2023-06-08

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2022J01920); 福建省本科高校教育教学研究项目 (FBJY20230167)

Fund: Natural Science Foundation of Fujian Province (2022J01920); Education and Teaching Research Project of Universities in Fujian Province (FBJY20230167)

引文格式: 练国富, 李益, 褚梦雅, 等. 斜面多道熔覆涂层平整度的数值模拟与试验研究[J]. 表面技术, 2024, 53(5): 126-136.

LIAN Guofu, LI Yi, CHU Mengya, et al. Numerical Simulations and Experimental Research on Flatness of Inclined Multi-channel Cladding Coatings[J]. Surface Technology, 2024, 53(5): 126-136.

*通信作者 (Corresponding author)

multi-channel fusion process simulation, and experimental design and analysis. The inclined heat source equation was derived according to the planar Gaussian heat source, and heat source parameters were checked through tests and simulations. The consistency of the cladding morphologies was verified to prove the feasibility of the model.

Multi-channel morphology research was carried out on the trajectory of single-channel cladding to explore the influences of scanning methods, inclination angles of substrates, and overlapping ratios on the flatness of multi-channel cladding. The laser scanning method significantly affected the flatness of the multi-channel inclined cladding morphology instead of the flatness of planar multi-channel overlapping. When the overlapping ratio was 30%, the cladding flatness obtained by scanning method 1 (SM1) and scanning method 5 (SM5) was relatively high under the same cladding conditions; that obtained by scanning methods 2, 3, 4, and 6 was relatively low. The greater the inclination angle of the substrate, the lower the flatness of the multi-channel cladding under the same powder-feeding amounts, laser power, laser scanning methods, and overlapping ratios. Flatness increased first and then decreased as the overlapping ratio increased under the same cladding conditions and laser scanning method. Taguchi orthogonal design was conducted to explore the influences of the inclination angles of substrates, laser scanning methods, and overlapping ratios on the morphologies of multi-channel cladding for inclined cladding substrates.

The variance analysis of the test results showed that the flatness of the multi-channel overlapping of the inclined substrate was significantly affected by the inclination angle of the substrate, the laser scanning method, the overlapping ratio, the quadratic term of the scanning method, the quadratic term of the overlapping ratio, the inclination angle of the substrate, and the interaction term of the scanning method. The relationships among the inclination angle of the substrate, scanning method, and overlapping ratio on flatness were consistent with those of the simulation. The inclination angle of the substrate and the scanning method and its square term significantly affected the cladding efficiency, which gradually decreased with the increase of the inclination angle. Compared with other cladding methods, scanning methods 1 and 5 had higher cladding efficiency.

Research on scanning methods in the work helps to obtain smoother surface coatings and provides theoretical guidance for applying laser cladding technology in inclined repair or remanufacturing.

KEY WORDS: laser cladding; inclined substrate; numerical simulation; scanning mode; evolution of molten pool; flatness

激光熔覆技术作为一种先进的表面改性技术,能够显著提高零件表面的耐磨性、耐腐蚀性、抗氧化性,逐步在工业生产中得到广泛的应用^[1-2]。与电镀、堆焊、等离子喷涂等工艺相比^[3],激光熔覆技术主要有以下优点:1)加工速度快,缩短生产时间^[4];2)设计自由,接近最终形状,适应复杂的形状,减少加工体积^[5];3)较低的稀释率、较小的影响区和热变形^[6];4)熔覆层与基材之间具有优异的结合性^[7];5)熔覆层机械性能优异^[8];6)提高待修复零件表面耐磨和耐腐蚀性能^[9]。

激光熔覆过程是一个复杂的多物理过程,激光、粉末和基材的相互作用,工艺参数和各参数之间的复杂交互作用都会影响熔覆成形质量。为了得到质量更好的熔覆层,国内外学者建立工艺参数与单道形貌特征的预测模型^[10],研究工艺参数和各参数的交互作用对单道熔覆层几何特征的影响关系。合理的工艺参数选取有助于显著提高激光熔覆质量及性能^[11]。Aghili等^[12]研究表明,激光功率、扫描速度、送粉速度显著影响熔覆层高度,激光功率和扫描速度显著影响熔覆层宽度,与Yu等^[13]的研究一致。Ma等^[14]采用响应面法建立稀释和残余应力的拟合模型,离焦量对稀释率影响显著,扫描速度对残余应力影响显著。He等^[15]通过线性回归方法,建立熔宽与激光功率、熔高与扫

描速度的函数表达式,为特殊形状基底修复提供理论指导。在工艺优化基础上,国内外学者还采取一些前处理来提高熔覆成形质量。Chen等^[16]研究表明,基材预热和降低扫描速度的方法有助于形成高TiC体积分数的复合材料,抑制裂纹的产生。Ding等^[17]研究表明,适当增大预热温度有助于减小试件表面残余应力,获得良好的机械性能。Wang等^[18]通过激光头连续变高度,同时保持激光头与待加工熔覆面始终垂直,获得了良好的曲面熔覆质量。

上述研究表明,针对单道熔覆成形工艺控制研究已经很成熟,但由于待熔覆零件尺寸较大,经常采用单轨叠加的方式进行加工,仅仅研究单道几何形状远远不够,需要基于单道熔覆成形,结合激光扫描方式、搭接率的控制,才能得到光滑平整的大面积涂层^[19]。水平基材多道工艺优化一直是国内外研究热点。Shi等^[20]采用25%的搭接率对不同粒径金属粉末进行多道熔覆研究,随着粉末粒径的减小,熔覆层质量较好,耐蚀性提高。Wang等^[21]建立灰色关联度与工艺参数的回归模型,提高激光功率、降低搭接率,改善多道熔覆层的表面质量。Kim等^[22]探究搭接率和送粉速率对多道熔覆成形差异的影响,由于搭接率增加,熔宽减小,熔高增加;适当增加送粉量有助于增加熔高,送粉量过大时容易产生裂纹。Huang等^[23]在Q235碳

钢表面进行多道熔覆试验,耐蚀性随着激光功率的增大先增大后减小,磨损性能较碳钢基材有较大改善。在 Guo 等^[10]的研究中,平整度随扫描速度的增加先增大后减小,激光功率对增加平整度有促进作用。上述研究为得到多道光滑平整的熔覆层提供理论指导,但现有平面成形研究理论不足以支撑斜面零件表面修复研究。

对于一些 45[#]钢制造的高强度活动件,如齿轮、齿条、叶轮等,其常见破坏形式有表面腐蚀、疲劳和氧化等^[24]。通过高强度激光束在 45[#]钢表面熔覆镍基涂层,有效地将碳钢优良的机械性能与镍基涂层的耐磨性相结合,延长零件的使用寿命。Zhu 等^[25]基于激光熔覆技术对 45[#]钢断裂齿轮进行再制造,确定扫描方式为横向激光扫描,搭接率为 20%。相比于原齿轮牙,再制造牙硬度高、耐磨性好。这表明,激光熔覆技术在斜面零件的表面修复及强化领域有极高的应用价值,但由于待熔覆零件结构复杂,需要考虑零件倾斜角度对熔覆成形质量的影响,倾斜基材对熔池形成的作用机理更加复杂。有必要对斜面基材表明熔覆成形进行进一步研究。Alya 等^[26]研究表明,随着倾斜角度的增加,粉末利用率逐渐降低。当倾角从 0°增加到 75°时,粉末利用率从 66%下降到 19%。Wang 等^[27]研究表明,激光功率影响熔宽,扫描速度和送粉速度影响熔高,倾斜角度对熔宽、熔高都有影响。Zeng 等^[28]通过 NSGA-II 算法和响应面优化器对斜面多道熔覆进行工艺参数优化,增大激光功率和搭接率或者减小扫描速度和送粉量都有助于提高表面平整度。

上述斜面熔覆工艺调控研究拓宽了激光熔覆技术在斜面零件修复领域的应用,但只局限于试验研究。熔池的流动行为反映了激光熔覆过程中传质、传热、对流等物理过程,其温度分布、几何形状直接关系到熔覆层的几何形状、组织和性能等质量^[29]。关于激光熔覆最相关的研究技术应该是基于物理模型的数值模拟与基于经验-统计模型的试验研究相结合。Yang 等^[30]对水平基材激光熔覆过程中能量分布进行研究,约 10%的能量熔化基材形成熔池,辐射到环境中的能量约占总能量的 53%。Yin 等^[31]模拟水平基材多道熔覆的预热和非预热过程的温度场,表明预热能有效降低裂纹的敏感性,更容易得到分布均匀、细化的晶粒。Yang 等^[32]基于水平基材探究激光功率和扫描速度对熔池中心温度分布的影响,增大激光功率和减小扫描速度都会使熔池面积增大,扫描速度只改变单位时间内基材和粉末吸收的能量。

虽然国内外学者对于斜面多道成形研究已经展开了一些研究,但更多是基于直接试验研究。但斜面熔覆过程中,激光-粉末-基材的相互耦合作用更复杂,仅通过试验研究不足以揭示斜面熔池演变机理。本文为了弥补斜面熔覆在扫描方式上研究的不足,结合数值模拟与试验研究,探究新的扫描方式和搭接率对斜

面多道平整度的影响。如基于喷嘴与待熔覆基材之间工作高度恒定,进行自上而下、自下向上的相邻或者间隔扫描,揭示熔覆搭接过程中熔池演变机理,为激光熔覆技术在斜面修复或再制造领域的应用提供理论指导。

1 试验材料与设备

本文所用激光熔覆设备如图 1 所示,详细设备型号见表 1。试验所用基材为 45[#]钢(40 mm×20 mm×10 mm),金属粉末为 Ni35A(平均粒径 100 μm)。熔覆之前,粉末放进真空环境烘干备用,对基材进行打磨和酒精擦拭。熔覆试验后,依次对试验所得样件进行线切割、镶嵌机镶嵌、打磨抛光和金相侵蚀剂腐蚀后,通过 KH-1300(Hirox Co Ltd, Tokyo, Japan)三维显微系统对其进行观察。

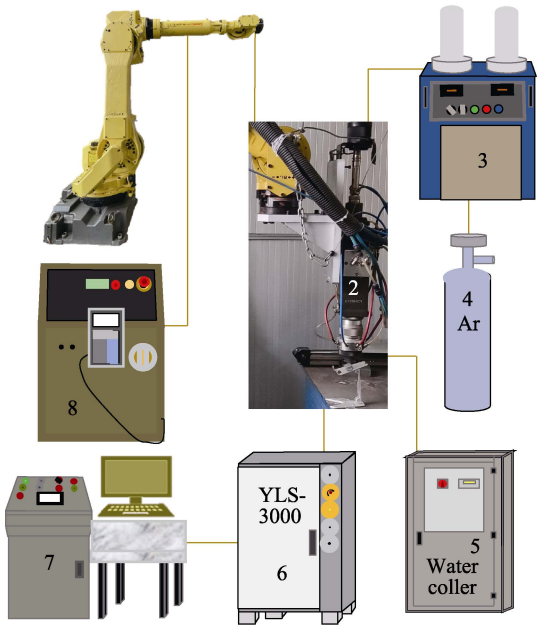


图 1 试验设备
Fig.1 Test equipment

表 1 熔覆设备和型号
Tab.1 Cladding equipment and models

Serial number	Device	Model and manufacturer
1	Industrial robot	M-710iC/50, FANUC, Japan
2	Laser cladding head	FDH0273/f= 300 mm, Lasermech, USA
3	Air-flow powder feeder	GZ-DPSF-2, Songxing, China
4	Shielding gas (Ar)	
5	Laser water chiller	TFLW-4000WDR-01-3385, Tongfei, China
6	Laser	YLS-3000, IPG, Germany
7	PLC control system	Mitsubishi, Japan
8	Robot controller	

图 2 为多道熔覆的搭接示意图, 搭接率 (η_{OR})、平整度 (F)、熔覆效率 (η) 的定义如式 (1)~(3) 所示。

$$\eta_{OR} = \frac{D}{w_s} \quad (1)$$

$$F = \frac{A_{clad}}{W \cdot H} \quad (2)$$

$$\eta = A_{clad} \times v \quad (3)$$

式中: w_s 为单道熔覆层宽度; D 为相邻两道熔覆层的偏移量; A_{clad} 为多道熔覆层面积; H 为多道熔覆层高度; W 为多道熔覆层宽度; v 为激光扫描速度。

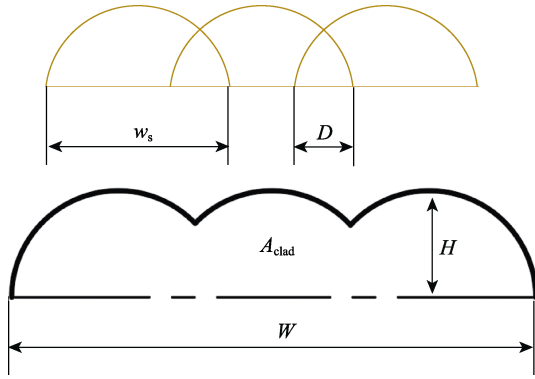


图 2 搭接示意图

Fig.2 Schematic diagram of overlapping

2 控制方程及物理模型

2.1 控制方程

由 Navier-Stokes 和连续性方程控制熔池的传质、传热过程, 包括质量守恒、动量守恒及能量守恒, 见式 (4)~(5) [33]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial t} (\bar{u}) + \nabla \mu \bar{u} \right] = -\nabla p \bar{I} + \nabla \bar{u} (\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T) + \rho g \beta (T_c - T_{amb}) - K_0 \bar{u} \frac{(1-f_1)^2}{f_1^3 + B} \quad (5)$$

式中: ρ 为密度; \bar{u} 为熔池流动的速度; t 为熔池流动的时间; ∇ 为梯度算子; μ 为流体的动态黏度; p 为流体的压力; $\rho g \beta (T_c - T_{amb})$ 表示浮力; g 为重力加速度; β 为热膨胀系数; T_c 和 T_{amb} 分别表示材料温度及环境温度; $K_0 \bar{u} (1-f_1)^2 / (f_1^3 + B)$ 表示两相区的动量扩散, K_0 为与多孔介质有关的常数, B 为小常数。液相质量分数 f_1 定义如下:

$$f_1 = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ S \left(\frac{T - T_s}{T_1 - T_s} \right) & T_s \leq T \leq T_1 \\ 1 & T > T_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S(x)$ 为阶跃函数; T_s 为固相线温度; T_1 为液相线温度。模型的传热方程为:

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{u} \nabla H \right] = \nabla \cdot (k \nabla T) - \frac{\partial H}{\partial t} - \rho \bar{u} \cdot \nabla H \quad (7)$$

式中: k 为热导率; C_p 为比热容; H 为熔池的热量; t 为熔池流动时间。等效比热容 C_p 和热导率 k 定义如下:

$$C_p = C_p(T) + L_f \frac{\partial f_L}{\partial T} \quad (8)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{f_L}{k_L} + \frac{f_s}{k_s} \quad (9)$$

式中: $C_p(T)$ 为比热容; L_f 为熔化潜热; k_L 和 k_s 分别为液相和固相的有效热导率。

能量边界条件包括热对流、热辐射、蒸发汽化引起的能量变化, 忽略蒸发汽化引起的能量损失。热对流和热辐射定义分别如式 (10) 和式 (11) 所示。

$$q_c = h_c (T_{amb} - T) \quad (10)$$

$$q_f = -\sigma \varepsilon (T_{amb}^4 - T^4) \quad (11)$$

式中: q_c 、 q_f 分别为热对流和热辐射引起的热量变化, J ; h_c 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_{amb} 为环境温度, 取 293 K; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; ε 为表面辐射系数。

熔池表面温度梯度发生变化引起流体表面张力梯度的变化, 表面张力和浮力在熔池内诱发 Marangoni 流动。表面张力 γ 和浮力 F_b 的定义如式 (12)~(13) 所示。

$$\gamma = \gamma_0 - \sigma (T - T_{amb}) \quad (12)$$

$$F_b = \rho g \beta (T - T_{amb}) \quad (13)$$

式中: γ_0 为环境温度下的表面张力; σ 为表面张力系数。

黏度是熔池流动中的主要阻力来源, 当熔池凝固时, 熔池内金属黏度大。熔池处于模糊区域时, 熔池包含固体和液体, 黏度 (μ) 与温度 (T) 之间的线性表达式为:

$$\mu = \mu(T) + \alpha T \quad (14)$$

式中: $\mu(T)$ 为初始黏度值; α 为黏度随温度变化系数; T 为模糊区域温度, 取值范围为材料固相线到液相线区间内。

考虑到激光熔覆过程是复杂的多物理过程, 为了减小模型计算难度, 对该模型做出如下假设: 1) 该模型所用材料为各向同性, 内部成分分布均匀; 2) 熔池内的液相为层流、黏性、不可压缩的牛顿流体; 3) 激光束能量密度和粉末浓度分布为高斯分布; 4) 固相、固液两相区、液相区是连续介质, 固相速度为 0; 5) 模拟过程忽略蒸发汽化引起的热流损失。

2.2 物理模型

模拟所用材料为 45# 钢基材和 Ni35A 粉末, 与试验相同, 其热物理参数如表 2 所示。在激光熔覆过程中, 粉末流与激光束相交后, 在激光束作用下熔

化进入熔池,随扫描时间冷却后在基材表面形成熔覆层。在这一熔覆过程中,包含众多复杂的物理过程,如熔池内部的对流传热和热传导、基材表面和空气存在对流和辐射换热。根据试验所用基材和粉末创建三维模型,并进行网格划分,如图3所示。由于熔池及其附近区域温度梯度很大,远离熔池和热影响区温度梯度较小,对网格采用不均匀画法,细化熔池区域的网格,粗化基材底部网格尺寸。

表 2 基本热物性
Tab.2 Basic thermal properties

Material	45 [#] steel	Ni35A
Density/(kg·m ⁻³)	7 760	8 310
Specific heat capacity/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	690	600
Solidus temperature/K	1 686	1 240
Liquidus temperature/K	1 764	1 500
Latent heat/(kJ·kg ⁻¹)	242	287
Solid phase thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	27.84	31.03
Liquid phase thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	32.78	37.89

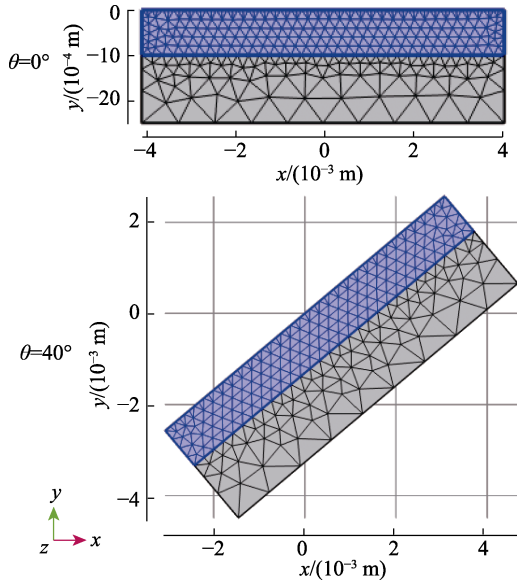


图 3 网格模型
Fig.3 Grid model

2.3 热源

激光能量密度分布服从高斯分布,光斑中心的能量密度最大,随着到光斑中心距离的增大,能量密度

逐渐缩减。随着基材倾斜角度的增大,基材上的光斑由圆形光斑逐渐演变成椭圆形光斑,如图4所示。

激光束竖直照射时,水平基材上的圆形光斑直径为 bc , 倾斜基材上椭圆形光斑的长半轴直径为 ef , 短半轴直径等于 bc 。

$$bc = 2R \quad (15)$$

$$ef = R \left[\frac{\cos \beta}{\cos(\theta + \varphi)} + \frac{\cos \beta}{\cos(\theta - \beta)} \right] \quad (16)$$

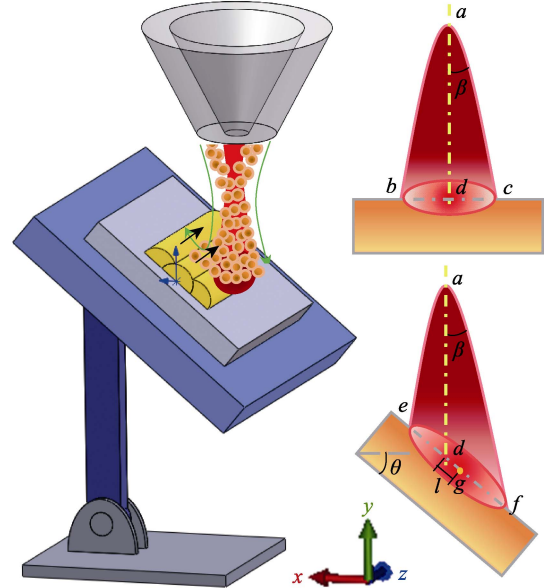


图 4 激光束模型
Fig.4 Laser beam model

式中: β 为激光束发射角的一半, θ 为基材的倾斜角度。倾斜基材上椭圆光斑的能量密度中心和水平基材上圆形光斑的能量密度中心的偏移量 l 为:

$$l = R \left[\frac{\cos \beta}{\cos(\theta + \beta)} - \frac{\cos \beta}{\cos(\theta - \beta)} \right] \quad (17)$$

激光熔覆过程中,喷嘴与基材之间的工作高度保持恒定。由于激光束沿着短半轴方向进行扫描,所以本文只考虑垂直于扫描路径方向的激光能量密度分布。激光能量密度在倾斜基材上的分布如式(18)~(19)所示。

$$Q(x, z) = \frac{k \times n \times P_{JG}}{\pi \times \left(\frac{ef}{2} \right)^2} \exp \left\{ \frac{-k \{ [(x-l) \times \cos \theta]^2 + (z - v \times t_s)^2 \}}{\left(\frac{ef}{2} \right)^2} \right\} \quad (18)$$

$$Q(x, z) = \frac{k \times n \times P_{JG}}{\pi \times \left[\frac{R \left[\frac{\cos \beta}{\cos(\theta + \beta)} + \frac{\cos \beta}{\cos(\theta - \beta)} \right]}{2} \right]^2} \times \exp \left\{ \frac{-k \left\{ \left(\left(x - R \left[\frac{\cos \beta}{\cos(\theta + \beta)} - \frac{\cos \beta}{\cos(\theta - \beta)} \right) \right) \times \cos \theta \right)^2 + (z - v \times t_s)^2 \right\}}{\left[\frac{R \left[\frac{\cos \beta}{\cos(\theta + \beta)} + \frac{\cos \beta}{\cos(\theta - \beta)} \right]}{2} \right]^2} \right\} \quad (19)$$

式中: k 为热源集中系数, n 为激光能量吸收率, P_{IG} 为激光功率, v 为激光束的扫描速度, t_s 为扫描时间。

2.4 模型验证

通过响应面法分别设计激光重熔试验与热源模拟方案, 进行 $0^\circ \sim 40^\circ$ 倾斜熔覆热源校核。模拟规律与试验规律一致, 验证了热源公式的准确性。在完成热源校核的基础上, 以激光功率 (P_{IG}) 为 1 500 W, 扫描速度 (v) 为 7 mm/s, 气流量 (Q) 为 12 NL/min (1 NL=101.425 mL), 送粉电压 (U) 为 26 V, 模拟激光熔覆单道激光熔覆熔凝过程。喷嘴与基材之间的工作高度 (h_{WH}) 直接影响进入熔池的粉末量^[34]。 h_{WH} 较小时或较大时, 熔池分别处于粉末流汇聚前的收缩区和汇聚后的发散区, 进入熔池的粉末量减少。只有熔池处于粉末流的焦点处, 粉末浓度增大, 粉末利用率提高, 本文 h_{WH} 为 9 mm。此时, 光斑直径约为 2 mm, 水平基材上激光能量密度为 10.714 kJ/cm^2 , 激光器的波长范围为 1 068~1 080 nm, 输出的额定功率为 3 000 W, 操作模式为 CW/Modulated。模拟结果如图 5 所示, 熔点以上温度视为熔池。模拟结果与试验结果一致, 基于单道涂层进行后续多道搭接平整度研究。

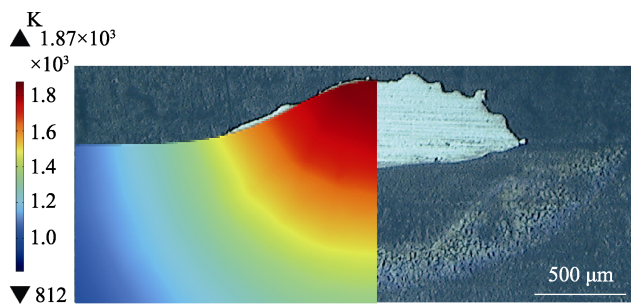


图 5 模型验证
Fig.5 Model validation

3 多道熔凝过程模拟

3.1 扫描方式对平整度影响

通过模拟基材的多道熔覆过程, 探究激光扫描方式对多道搭接平整度的影响。如图 6 所示, 激光扫描方式对水平基材多道搭接平整度无明显影响, 但对倾斜基材熔覆多道平整度有显著影响。相同的熔覆条件下, 搭接率为 20% 时, 扫描方式 1 (SM1) 和扫描方式 5 (SM5) 得到的熔覆层平整度相对较高, 扫描方式 2、3、4 得到的熔覆层平整度相对较低。主要因为, 对于扫描方式 1 和 5, 存在全部或者部分从下向上搭接。当激光束从下向上进行扫描, 在熔化金属粉末形成熔覆层的同时, 为下一道熔覆提供预热^[35]。下一道激光束熔化的液体熔池在重力作用下向下流淌, 填补相邻两道熔覆层之间的沟壑, 且下一道激光束对前一

道熔覆层进行重熔, 已凝固的熔覆层在激光束作用下继续向下流平, 当前扫描方式得到的多道熔覆层平整度较高。采用扫描方式 2、3、4 熔覆时, 存在全部或者部分从上向下熔覆。当激光束从上向下扫描时, 金属熔池向下流淌, 且在第二道激光束重熔作用下继续向下流淌, 因此相邻两道熔覆层之间的沟壑完全填平。但由于向下流淌的液态金属增多, 导致下一层熔覆层高度高于前一道, 平整度变差。

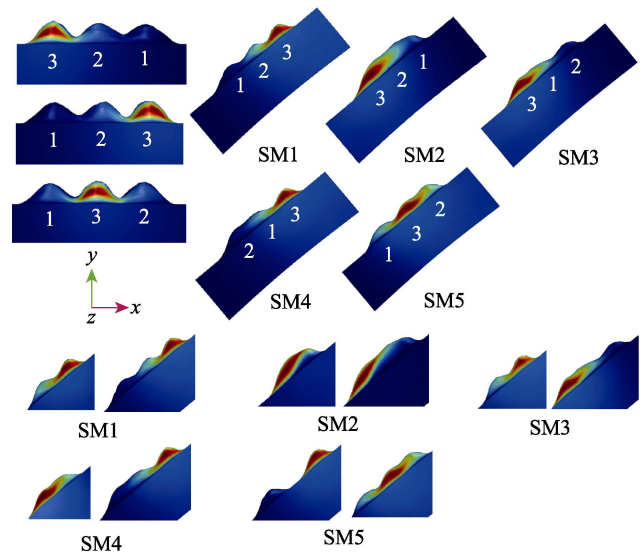


图 6 扫描方式对平整度的影响
Fig.6 Effect of scanning method on flatness

3.2 基材倾斜角度对平整度影响

如图 7 所示, 以扫描方式 5 (搭接率 30%), 对倾斜 $0^\circ \sim 40^\circ$ 的基材进行多道搭接模拟。送粉量、激光功率、激光扫描方式和搭接率相同时, 平整度随着基材倾斜角度的增加逐渐降低。基材水平熔覆时, 基材上的光斑、粉末分布均为对称性, 此时搭接成形的熔覆层平整度较高。当基材进行倾斜熔覆时, 倾斜基材上椭圆光斑的能量密度中心和水平基材上圆形光斑的能量密度中心的具有一定的偏移量, 倾斜基材上的热源为偏心热源。由于基材具有一定的倾斜角度, 粉末流动过程中受到重力影响, 此时粉斑在基材上的对称性随着倾斜角度的增加逐渐降低。金属粉末在激光能量作用下, 熔化后向下流淌, 是导致倾斜形貌非对称性关系的主要原因。当激光进行第三道熔覆时, 粉末流从喷嘴出口喷出, 先锥形收缩汇聚再锥形发散。由于第二道熔覆层的存在, 喷嘴到第二道熔覆层顶端的距离较小, 粉末颗粒先到达第二道熔覆层的顶端, 在高温热源的作用下先熔化, 然后在重力作用下向下流动, 凝固成第三道熔覆层。因此, 基材倾斜角度越高, 喷嘴到第二道熔覆层顶端的距离越小, 多道熔覆的平整度越低。

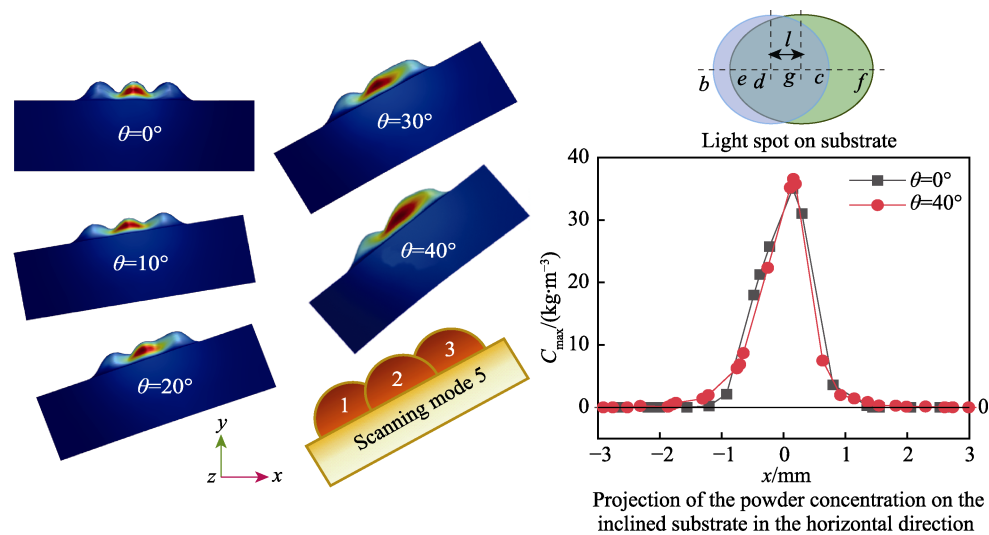


图 7 基材倾斜角度对平整度的影响
Fig.7 Effect of substrate inclination angle on flatness

3.3 搭接率对平整度影响

相同的熔覆条件和激光扫描方式下，搭接率对平整度的影响关系如图 8 所示，平整度随着搭接率的增加先增大后减小。图 8a 为水平基材熔覆。搭接率为 10%时，相邻两道熔覆层间隙过大，在 高能激光束下熔化的金属粉末不足以填补间隙，激光束对已经凝固的熔覆层的重熔作用也较小，此时平整度较低。搭接率为 30%时，相邻两道熔覆层间隙有所缩小，相邻两道之间的凹陷区也随搭接率的增加而减小。第三道激光束在完成熔覆成形任务的同时，会对其他已凝固的熔覆层进行部分表面重熔。在激光能量的作用下，已经凝固的熔覆层重新熔化后继续向下流动，对相邻两道之间的间隙进行填补，平整度因此增大。搭接率为 70%时，相邻两道熔覆层之间的间隙过小，在填补完间隙后，剩余的粉末在间隙顶部堆积，此时搭接后的熔覆层接近三角形。图 8b 为倾斜基材熔覆。平整度随着基材倾斜角度的增加逐渐降低，随着搭接率的增

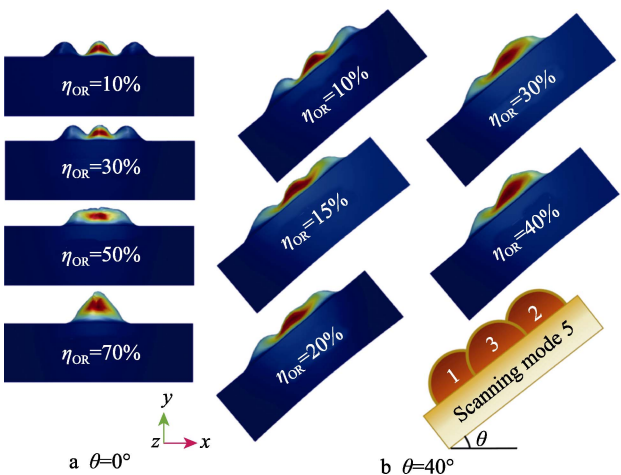


图 8 搭接率对平整度的影响
Fig.8 Effect of overlapping ratio on flatness

加先增大后减小，搭接率为 15%~20%时平整度较好。搭接率过小，相邻两道间隙过大；搭接率过大时，第二道激光束熔化的液体熔池在重力作用下向下流淌后凝固，待第三道激光束扫描时，第三道涂层与第二道涂层产生堆叠，造成平整度降低。

4 试验设计

采用田口正交设计方法探究基板倾斜熔覆时基材倾斜角度 (θ)、激光扫描方式 (SM)、搭接率 (η_{OR}) 对多道熔覆成形形貌的影响规律。在不考虑各因素之间相互作用的条件下，选择 $L_{25}(5^4)$ 正交表进行三因素五水平的正交试验。因素和水平如表 3 所示。

表 3 因素水平表
Tab.3 Factor level

Level	$\theta/(^{\circ})$	SM	$\eta_{OR}/\%$
1	0	1	10
2	10	2	20
3	20	3	30
4	30	4	40
5	40	5	50

基材倾斜熔覆时，5 种激光扫描方式如图 9 所示。第 1 种，基材倾斜角度为 θ ，激光束从下向上扫描；第 2 种，激光束从上至下进行扫描；第 3、4 种，激光束先中间扫描，再分别从两边进行搭接；第 5 种，激光束先间隔扫描，再进行中间填充。

4.1 试验方案与结果

试验结果如表 4 所示，以平整度、熔覆效率为输出指标，揭示基材倾斜角度、激光扫描方式、搭接率对倾斜基材多道形貌的影响规律。

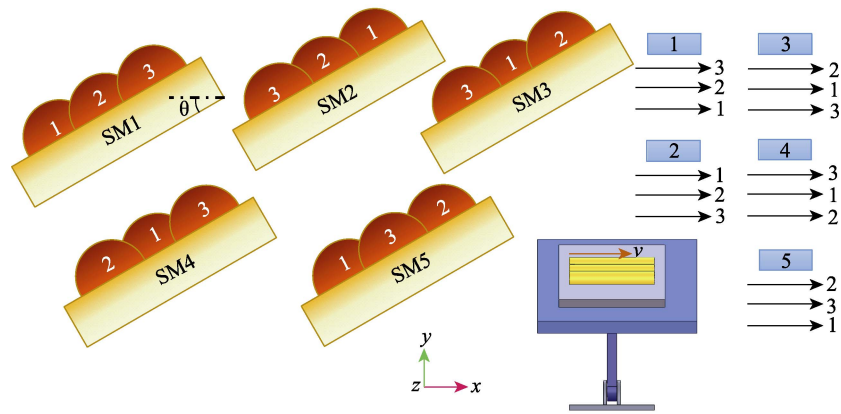


图 9 激光扫描方式
Fig.9 Laser scanning method

表 4 试验方案及结果 Tab.4 Test plan and results					
No.	$\theta/(^{\circ})$	SM	$\eta_{\text{OR}}/\%$	F	$\eta/\%$
1	0	1	10	0.747	36.526
2	0	2	20	0.754	35.098
3	0	3	30	0.795	33.047
4	0	4	40	0.741	31.269
5	0	5	50	0.697	33.95
6	10	1	20	0.8	34.559
7	10	2	30	0.805	30.303
8	10	3	40	0.734	30.695
9	10	4	50	0.696	32.018
10	10	5	10	0.72	31.885
11	20	1	30	0.78	33.089
12	20	2	40	0.732	29.673
13	20	3	50	0.688	29.813
14	20	4	10	0.642	30.667
15	20	5	20	0.729	33.509
16	30	1	40	0.709	30.716
17	30	2	50	0.603	25.837
18	30	3	10	0.619	23.765
19	30	4	20	0.695	24.871
20	30	5	30	0.815	29.176
21	40	1	50	0.595	30.478
22	40	2	10	0.595	25.515
23	40	3	20	0.682	20.902
24	40	4	30	0.692	22.596
25	40	5	40	0.79	26.992

部分斜面搭接形貌如图 10 所示。No.4 样件夹渣处产生裂纹,这主要是由于随着基材倾斜角度的增加,基材上粉末浓度降低,相同能量密度下,0°基材上粉末浓度较大,激光能量不足以熔化金属粉末,从而引起夹渣现象,导致裂纹的产生。样件 No.20 和 No.25 有明显的热应力导致的熔覆层裂纹,这主要是由于基材倾斜角度的增加且在重力作用下,导致粉末利用率降低,基材上的粉末量减小,采用相同的激光能量熔覆,且搭接率过高,熔池内部热累积作用导致裂纹产生。对比样件 No.20 和 No.25,样件 No.25 粉末量更少,但搭接率更高,激光束能量远大于金属粉末熔化所需的能量,能量局部富集,热应力过大引起开裂,因此样件 No.25 的裂纹更加显著。

4.2 试验结果分析

4.2.1 平整度分析

平整度 F 与 θ 、 F_{SM} 、 η_{OR} 的回归拟合方程为:
$$F=0.7197-0.005510\theta-0.0844F_{\text{SM}}+0.01374\eta_{\text{OR}}+0.01105F_{\text{SM}}\cdot F_{\text{SM}}-0.000221\eta_{\text{OR}}\cdot\eta_{\text{OR}}+0.001120\theta\cdot F_{\text{SM}}\tag{20}$$

式中: F_{SM} 表示扫描方式对应的数值。通过数学建模,将抽象的斜面多道平整度问题转化为明确的数学模型,采用数学求解模型的方法更高效地分析斜面多道搭接平整度与工艺参数、扫描方式的内在联系。如公式(20)所示,倾斜角度与平整度存在负线性增长关系,扫描方式和搭接率与平整度是二次函数关系,倾斜角度和扫描方式的交互作用影响斜面多道平整度。

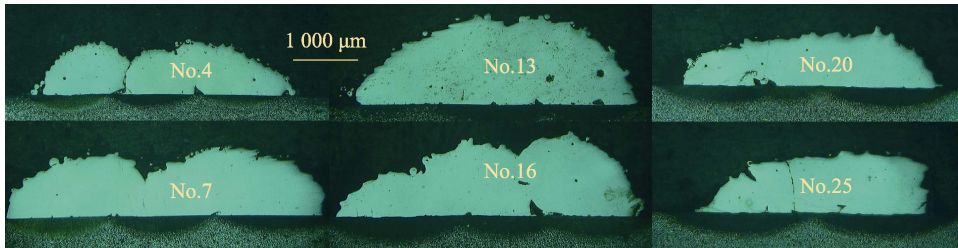


图 10 部分斜面搭接形貌
Fig.10 Topography of part of inclined plane overlap

P 值表示因素对试验结果无显著性的概率, 当 P 值小于 0.05 时, 说明该因素对试验指标影响显著。平整度的方差分析如表 5 所示。平整度回归拟合模型的 P 值小于 0.001, Adjusted R^2 值与 Predicted R^2 值的差值小于 0.2, 说明该模型的显著性较高, 预测能力较好。由表 5 可知, 基材倾斜角度、激光扫描方式、搭接率、扫描方式的二次项、搭接率的二次项、基材倾斜角度和扫描方式的交互是影响倾斜基材多道搭接平整度的显著因素。

表 5 平整度的方差分析表
Tab.5 Analysis of variance table for flatness

Source	df	Adj SS	Adj F_{SM}	F-value	P-value
Regress	6	0.095 124	0.015 854	28.05	<0.001
θ	1	0.020 436	0.020 436	36.15	<0.001
F_{SM}	1	0.012 042	0.012 042	21.3	<0.001
η_{OR}	1	0.030 262	0.030 262	53.54	<0.001
$F_{SM} \times F_{SM}$	1	0.008 548	0.008 548	15.12	0.001
$\eta_{OR} \times \eta_{OR}$	1	0.027 349	0.027 349	48.38	<0.001
$\theta \times F_{SM}$	1	0.008 776	0.008 776	15.53	0.001
Error	18	0.010 175	0.000 565		
R-Squared	0.903 4	Adj R-Squared	0.871 2	Pred R-Squared	0.806 5

各因素对基材倾斜熔覆的平整度的影响如图 11 所示。平整度随着基材倾斜角度的增加逐渐降低, 随着搭接率的增加先增加后减小, 扫描方式 1 和扫描方式 5 优于其他扫描方式。这主要是因为, 对于倾斜基材, 激光束照射在基材上的光斑投影由圆形转变成椭圆形, 液体熔池在重力作用下向下流淌。熔宽随倾斜角度的增加逐渐增大, 由于重力因素导致熔覆面积随倾斜角的增加逐渐减小, 平整度随之减小。搭接率较小时, 相邻两道熔覆层之间的间隙较大, 熔覆层不足以填补间隙导致平整度较低; 搭接率过大时, 熔覆层在填补间隙后在熔覆层顶部堆积, 导致平整度降低。相比其他扫描方式, 扫描方式 1 和 5 得到的涂层熔覆面积更大, 扫描方式 1 对应的熔高较小, 扫描方式 5

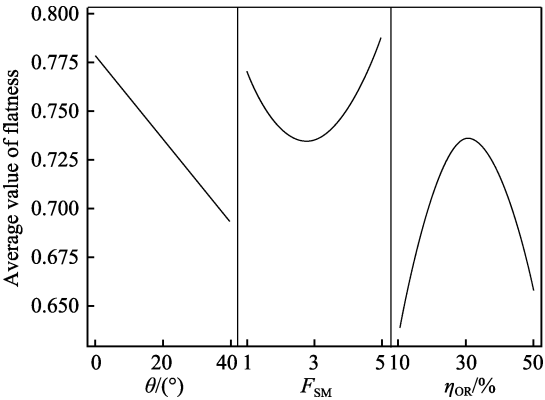


图 11 平整度拟合均值主效应图
Fig.11 Main effect diagram of mean value of flatness fitting

对应的熔宽较小, 这 2 种方式得到的涂层平整度相对较高。试验结果与第 3 节模拟结果一致。

扫描方式和基材倾斜角度的交互作用对平整度的影响关系如图 12 所示。扫描方式 1 和 5 优于其他扫描方式, 随着基材倾斜角度的增加, 平整度逐渐降低。随着基材倾斜角度的增加, 重力对粉末流动的影响显著, 粉末颗粒在流动过程中流失加剧, 基材上的粉末量减少, 熔覆效率降低。

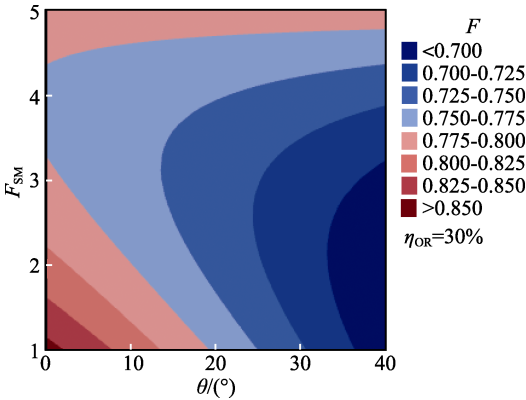


图 12 F_{SM} 和 θ 交互对平整度的等值线图
Fig.12 Contour diagram of interaction between F_{SM} and θ against flatness

4.2.2 熔覆效率

熔覆效率与 θ 、 F_{SM} 的回归拟合方程为:
$$\eta = 43.58 - 0.2238\theta - 7.13F_{SM} + 1.107F_{SM} \cdot F_{SM} \quad (21)$$

如式 (21) 所示, 倾斜角度与熔覆效率存在负线性关系, 扫描方式和熔覆效率是二次函数关系。熔覆效率随基材倾斜角度的增大逐渐降低。

熔覆效率方差分析如表 6 所示, 熔覆效率回归拟合模型的 P 值小于 0.001, Adjusted R^2 值和 Predicted R^2 值的差值小于 0.2, 说明该回归模型显著性较高, 具有较理想的预测能力。 θ 、 F_{SM} 、 F_{SM} 的二次项对熔覆效率影响显著。

表 6 熔覆效率的方差分析表
Tab.6 Variance analysis of cladding efficiency

Source	df	Adj SS	Adj F_{SM}	F-value	P-value
Regress	3	348.43	116.142	50.4	<0.001
θ	1	250.47	250.472	108.69	<0.001
F_{SM}	1	95.27	95.27	41.34	<0.001
$F_{SM} \times F_{SM}$	1	85.73	85.735	37.2	<0.001
Error	21	48.39	2.304		
R-Squared	0.878	Adj R-Squared	0.860 6	Pred R-Squared	0.827 7

如图 13 所示, 熔覆效率随着倾斜角度的增加逐渐减小, 相比其他熔覆方式, 扫描方式 1 和 5 的熔覆效率较高。这主要是因为, 随着基材倾斜角度的增大, 粉末颗粒反弹角增大, 且在重力和保护气的作用下,

进入熔池的金属粉末减少, 降低了粉末利用率。喷嘴与基材之间的工作高度恒定时, 扫描方式 2、3、4 得到的熔覆层平整度较低, 存在两道涂层堆叠现象, 扫描方式 1、5 获得的多道涂层更平整, 多道熔宽增加, 因此熔覆面积更大, 熔覆效率更高。

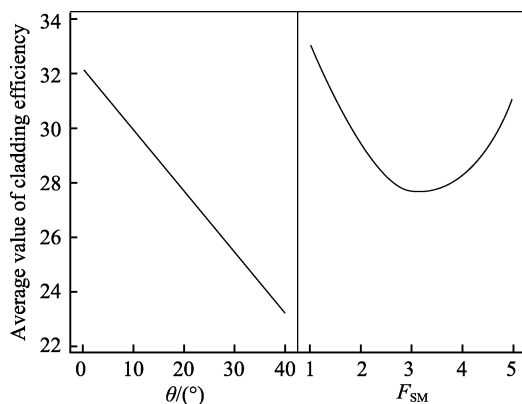


图 13 熔覆效率的拟合均值主效应图

Fig.13 Fitted mean main effect diagram of cladding efficiency

综上所述, 本文数值模拟结果与试验结果一致, 平整度随基材倾斜角度的增大逐渐减小, 随搭接率的增大先增大后减小, 扫描方式 1 和 5 获得的平衡度相对较高。通过数值模拟的方式, 不仅能够降低试验数量和经济成本, 更有助于分解探讨激光熔覆斜面修复过程, 明晰不同扫描方式下多道熔池演变过程, 揭示扫描方式对斜面多道平整度的影响机理。

5 结论

1) 相同的送粉量、激光功率、扫描方式、搭接率时, 平整度随着基材倾斜角度的增加逐渐降低。

2) 激光扫描方式对平面多道搭接的平整度无明显影响, 但由于重力因素, 对倾斜熔覆多道熔覆涂层的平整度影响显著。与其他扫描方式对比, 扫描方式 1 (SM1) 和扫描方式 5 (SM5) 得到的熔覆层平整度相对较高。

3) 相同的熔覆条件和激光扫描方式下, 平整度随着搭接率的增加先增大后减小。

4) 试验研究中, 平整度随基材倾斜角度、扫描方式、搭接率的变化规律与模拟一致, 熔覆效率随基材倾斜角度的增加逐渐减小, 相比其他熔覆方式, 扫描方式 1 和 5 的熔覆效率较高。

参考文献:

[1] ZHANG G, SUN W L, ZHAO D M, et al. Effect of Laser Beam Incidence Angle on Cladding Morphology in Laser Cladding Process[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(4): 1531-1537.

[2] LIU Y N, DING Y, YANG L J, et al. Research and Progress of Laser Cladding on Engineering Alloys: A Review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 341-363.

[3] 王成, 王伟, 丁士杰, 等. 激光熔覆铁基耐磨涂层的制备及摩擦学性能研究[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202011.

WANG C, WANG W, DING S J, et al. Preparation and Tribological Properties of Fe-Based Wear-Resistant Coating by Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202011.

[4] TORIMS T. The Application of Laser Cladding to Mechanical Component Repair, Renovation and Regeneration[J]. Daaam International Scientific Book, 2013, 12: 587-608.

[5] CALLEJA A, TABERNERO I, FERNANDEZ A, et al. Improvement of Strategies and Parameters for Multi-Axis Laser Cladding Operations[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 56: 113-120.

[6] XIAO Q, SUN W L, YANG K X, et al. Wear Mechanisms and Micro-Evaluation on WC Particles Investigation of WC-Fe Composite Coatings Fabricated by Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 420: 127341.

[7] CUI C, WU M P, MIAO X J, et al. Microstructure and Corrosion Behavior of $\text{CeO}_2/\text{FeCoNiCrMo}$ High-Entropy Alloy Coating Prepared by Laser Cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 890: 161826.

[8] QI K, YANG Y, SUN R, et al. Effect of Magnetic Field on Crack Control of Co-Based Alloy Laser Cladding[J]. Optics Laser Technology, 2021, 141: 107129.

[9] SEXTON C L, BYRNE G, WATKINS K G. Alloy Development by Laser Cladding: An Overview[J]. Journal of Laser Applications, 2001, 13(1): 2-11.

[10] GUO C G, HE S Z, YUE H T, et al. Prediction Modelling and Process Optimization for Forming Multi-Layer Cladding Structures with Laser Directed Energy Deposition[J]. Optics Laser Technology, 2021, 134: 106607.

[11] SIDDIQUI A A, DUBEY A K. Recent Trends in Laser Cladding and Surface Alloying[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 134: 106619.

[12] AGHILI S, SHAMANIAN M. Investigation of Powder Fed Laser Cladding of NiCr-Chromium Carbides Single-Tracks on Titanium Aluminide Substrate[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 119: 105652.

[13] YU T B, SHI B W, SONG B X. Process Parameters Optimization of Single-Track Laser Cladding for 45 Steel Gear Remanufacturing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1549(3): 032144.

[14] MA M Y, XIONG W J, LIAN Y, et al. Modeling and Optimization for Laser Cladding via Multi-Objective Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 381: 125129.

[15] HE C, WU W X, LI S, et al. Sidewall Shape Control Using Direct Laser Fabrication Technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,

- 2022, 121(1): 1101-1110.
- [16] CHEN H, LU Y Y, SUN Y S, et al. Coarse TiC Particles Reinforced H13 Steel Matrix Composites Produced by Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 395(9): 125867.
- [17] DING C G, CUI X, JIAO J Q, et al. Effects of Substrate Preheating Temperatures on the Microstructure, Properties, and Residual Stress of 12CrNi₂ Prepared by Laser Cladding Deposition Technique[J]. Materials, 2018, 11(12): 2401.
- [18] WANG X L, SUN W L, CHEN Y, et al. Research on Trajectory Planning of Complex Curved Surface Parts by Laser Cladding Remanufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(5): 2397-2406.
- [19] CHEN C R, LIAN G F, JIANG J B, et al. Simplification and Experimental Investigation of Geometrical Surface Smoothness Model for Multi-Track Laser Cladding Processes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 621-628.
- [20] SHI C W, LIU P, YAN D F, et al. Effect of the Particle Size of Cladding Materials on the Morphology and Corrosion Resistance of Fe-Based Laser Cladding Layers[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(2): 1788-1795.
- [21] WANG Q T, ZENG X B, CHEN C R, et al. An Integrated Method for Multi-Objective Optimization of Multi-Pass Fe50/TiC Laser Cladding on AISI 1045 Steel Based on Grey Relational Analysis and Principal Component Analysis[J]. Coatings, 2020, 10(2): 151.
- [22] KIM J D, PARK S H, SONG M K. A Study on the Characteristics of Laser Cladding Using the LC-190 Cemented Carbide Powder(II)- Characteristic Analysis of Multi-Pass Clad Layer[J]. Journal of Welding and Joining, 2018, 36(6): 40-45.
- [23] HUANG F F, LIU E J, QIN Y, et al. A Study of Multi-Pass Laser-Cladding 2205 Duplex Stainless Steel Coating: Microstructure, Electrochemical Corrosion Behavior, and Wear-Resistance Properties[J]. Coatings, 2022, 12(2): 229.
- [24] JI Y D, GONG H Y, SHEN C T, et al. Effect of Lap Ratio on Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni Based Coating on 45 Steel[C]//2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM). Shanghai: IEEE, 2019: 269-272.
- [25] ZHU L D, WANG S H, PAN H C, et al. Research on Remanufacturing Strategy for 45 Steel Gear Using H13 Steel Powder Based on Laser Cladding Technology[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 344-354.
- [26] ALYA S, VUNDRU C, ANKAMREDDY B, et al. Characterization and Modeling of Deposition Geometry in Directed Energy Deposition over Inclined Surfaces[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 34: 695-703.
- [27] WANG D, LI T, SHI B W, et al. An Analytical Model of Bead Morphology on the Inclined Substrate in Coaxial Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 410: 126944.
- [28] ZENG J Y, LIAN G F, FENG M Y, et al. Inclined Shaping Quality and Optimization of Laser Cladding[J]. Optik, 2022, 266: 169598.
- [29] LEI K Y, QIN X P, LIU H M, et al. Analysis and Modeling of Melt Pool Morphology for High Power Diode Laser Cladding with a Rectangle Beam Spot[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 89-99.
- [30] YANG W H, CHENG Y H, ZHANG Y P, et al. Research on Energy Distribution and Solidification Characteristics during Laser Cladding Based on Numerical Simulation[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 49: 104125.
- [31] YIN H G, LI J H, ZHAO L W, et al. Simulation of In-Situ Preheating of Ni-Based Multi-Layer and Multi-Pass Coatings on H13 Steel[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(9): 4671-4680.
- [32] YANG S R, BAI H Q, LI C F, et al. Numerical Simulation and Multi-Objective Parameter Optimization of Inconel718 Coating Laser Cladding[J]. Coatings, 2022, 12(5): 708.
- [33] CHEN L Y, YU T B, XU P F, et al. In-Situ NbC Reinforced Fe-Based Coating by Laser Cladding: Simulation and Experiment[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 412: 127027.
- [34] ZHOU V, ODUM K, SOSHI M, et al. Development of a Height Control System Using a Dynamic Powder Splitter for Directed Energy Deposition (DED) Additive Manufacturing[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2022, 7(5): 1085-1092.
- [35] ZHAO H Y, ZHANG H T, XU C H, et al. Temperature and Stress Fields of Multi-Track Laser Cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19: s495-s501.