

# 基于热力耦合的激光熔覆数值模拟与实验研究

任仲贺<sup>1,2</sup>, 武美萍<sup>1,2\*</sup>, 唐又红<sup>3</sup>, 韩基泰<sup>1</sup>, 龚玉玲<sup>1</sup>

<sup>1</sup>江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

<sup>2</sup>江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

<sup>3</sup>苏州出入境检验检疫局, 江苏 苏州 215021

**摘要** 基于热-结构间接耦合非线性有限元分析, 在不同的激光工艺参数下, 利用 ANSYS 生死单元技术对激光熔覆的温度场和应力场进行了数值模拟, 研究了激光功率和扫描速度对温度场和应力场分布规律的影响。结果表明, 通过分析有限元模型的温度分布规律和试件金相组织的形貌特征, 验证了该模型的可靠性; 熔覆层温度变化分为脉冲式急速上升和呈双曲线形状下降两个阶段; 沿激光扫描方向, 熔覆层表面多个节点的温度-时间曲线具有逐渐增大的峰值; 熔覆层与基体结合面中部沿 Z 轴方向, 靠近固定端应力较大, 基底中部沿 X 轴方向应力呈 W 状对称分布, 自由端中部沿 Y 轴方向, 熔覆层和基体结合处易产生应力集中和突变。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 有限元模拟; 生死单元; 温度场; 应力场

中图分类号 TN249; TG174.44

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.051404

## Numerical Simulation and Experimental Research of Laser Cladding Based on Thermo-Mechanical Coupling

Ren Zhonghe<sup>1,2</sup>, Wu Meiping<sup>1,2\*</sup>, Tang Youhong<sup>3</sup>, Han Jitai<sup>1</sup>, Gong Yuling<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

<sup>2</sup> Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

<sup>3</sup> Suzhou Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Suzhou, Jiangsu 215021, China

**Abstract** The temperature and stress fields of the laser cladding are numerically simulated by ANSYS birth-death element technique based on the thermo-mechanical indirect coupling nonlinear finite element analysis. The results show that this proposed model is reliable by analyzing the temperature distribution of the finite element model and the morphological characteristics of the metallographic structure of the experimental specimens. The temperature change of the cladding layer can be divided into two stages. In the first stage, the temperature rises rapidly like a pulse. In the second stage, the temperature drops to the overall temperature of the matrix which likes a hyperbolic shape. On the surface of the cladding layer and along the laser scanning direction, the peaks of the temperature time curves of multiple nodes show a trend of gradual increase. The distribution curves of the residual stress show that there is a greater residual stress at the position near the fixed end along the Z axis in the middle of the bonding surface of the cladding layer and the matrix. The residual stress is distributed symmetrically like the shape of W along the X axis in the middle of the matrix undersurface which is likely to cause stress concentration and mutation at the interface between the cladding layer and the matrix along the Y axis in the middle of the free end.

**Key words** laser technique; laser cladding; finite element simulation; birth-death element; temperature field; stress field

**OCIS codes** 140.3390; 140.3460; 350.3390

收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2018-09-12 录用日期: 2018-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(51575237)、装备预研教育部联合基金(6141A0221)、江苏出入境检验检疫局科技计划项目(2018KJ04)

\* E-mail: wmp169@jiangnan.edu.cn

## 1 引言

在建设资源节约型和环境友好型社会,发展循环经济的大背景下,开发再制造技术将产生巨大的经济效益和社会效益<sup>[1-2]</sup>。作为再制造修复的一种常见加工技术,激光熔覆利用高能激光束辐照熔覆粉末颗粒与基体材料,使粉末颗粒完全熔化、基体材料表面微熔、冷凝后二者形成冶金结合整体,从而有效改善基体材料的耐磨、耐腐蚀及耐疲劳等性能,具有热影响区小、冶金结合良好、熔覆层组织致密等优点<sup>[3]</sup>。在激光熔覆过程中,材料的升温速度和熔池的冷凝速度极快,所产生的温度场和应力场与熔覆层裂纹敏感性存在着密切联系,高能激光束作为能量来源,其工艺参数对温度场和应力场具有重要影响<sup>[4-8]</sup>。

国内外学者针对激光熔覆过程数值模拟和激光工艺参数影响规律进行了相关研究,取得了一定的研究成果。Mirzade 等<sup>[9]</sup>通过研究同轴送粉激光熔覆的数值模型,发现影响熔池动力学和温度的主要参数为激光功率、扫描速度和送粉速率。李豪等<sup>[10]</sup>通过建立基于椭圆热源的三维瞬态激光熔覆有限元模型,研究了温度场和流场的特征,发现温度场具有后拖现象,流体速度矢量在熔池中部主要分布于纵向截面内。刘昊等<sup>[11]</sup>针对送粉式激光熔覆,建立了计算瞬态温度场及熔覆层几何形貌的三维数值模型,通过不同送粉速率的熔覆实验,验证了模型的有效性。综合已有文献可看出,通过有限元方法能够实现激光熔覆过程的有效模拟,特别是在熔覆过程中瞬态温度场的特征方面,有了较多的研究成果,但针对不同激光工艺参数下激光熔覆温度场和应力场分布规律及对薄板类熔覆件变形影响的研究相对较少。

为探索激光工艺参数影响规律,提高熔覆质量,本文在研究激光熔覆基本原理的基础上,基于有限元分析的生死单元技术,利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 建立了单道激光熔覆的热传导模型,在温度场的基础上,通过单元转换,把热分析模型转换为结构分析模型,得到激光熔覆的应力场,通过对 6 组不同的激光工艺参数进行数值模拟和熔覆实验,探索了激光功率和扫描速度对温度场和应力场分布规律的影响,为减小薄板类熔覆件的变形提供理论依据。

## 2 激光熔覆基本原理

激光熔覆作为一种利用高能激光束熔合金粉

末及基体表层并使二者形成良好冶金结合的先进表面加工技术,是一个强非线性多物理场耦合的过程,具有熔池小、热量高、变化快的特点,很难得到温度、应力和组织等场量的解析结果,采用有限元软件建立模型对激光熔覆过程进行数值模拟,是研究激光熔覆机理和优选工艺参数的有效途径<sup>[12-15]</sup>。

## 3 数值模拟与结果分析

### 3.1 有限元模型的建立

利用 ANSYS 有限元软件对单道激光熔覆的温度场和应力场进行数值模拟,基本思路为:1) 在激光熔覆过程的某个时刻,激光辐照集中在基体表面一个较小区域,形成熔池;2) 熔池的高温经过热传导作用传递给基体材料,改变基体的温度分布,形成不均匀的温度场,从而产生一定的温度梯度,并且随着激光辐照区域的移动而发生动态改变;3) 在温度梯度的作用下,材料发生膨胀或收缩,且熔覆层和基体作为两种不同的材料而具有不同的线膨胀系数,从而导致模型原始位置的每个节点发生不同方向和大小的位移,即材料发生不同方向和程度的膨胀或收缩,于是形成了不同程度的热应变;4) 考虑到熔覆层和基体材料的弹性模量、屈服强度、切变模量和泊松比等力学参数一般不同,从而会产生一定的热应力,最终表现为位移云图上的结构变形和应力云图上的残余应力。

考虑激光熔覆实际过程中各种影响因素相互作用和多物理场耦合的复杂性,需要在一定程度上对有限元模型进行合理简化:1) 忽略激光传播过程中反射、折射等物理现象的影响,激光吸收率不随温度变化;2) 假设粉末和基体材料吸收的有效能量全部用于升温,温度场只受激光功率与热物性参数影响;3) 忽略熔池中液体的流动和表面张力,将流体视为屈服应力极低的固体<sup>[16]</sup>;4) 假设环境状态稳定且材料各向同性<sup>[17]</sup>;5) 忽略粉末和基体材料在熔化过程中因元素扩散导致的物理化学性质改变的影响<sup>[14]</sup>。

针对三维温度场数值模拟计算,ANSYS 有多种热分析单元,其中三维 8 节点 6 面体单元比较适合在空间和时间上因激光能量辐照导致的温度剧烈变化情况,具有较高的精度。模型选择 SOLID70 单元类型,具有 8 个节点,每个节点包含 1 个自由度温度,可以输出节点温度、温度变化分量等,适用于瞬态和稳态的热分析,可实现匀速热流的传递,并且能够转换为 SOLID45 结构单元进行残余应力分析。

模型的基体材料为 316L 不锈钢,熔覆粉末选

用钴基合金。使用 ANSYS 进行数值模拟时,需给定材料的热学和力学参数,主要包括:材料密度、比热容、考虑熔池对流的热传导系数、考虑辐射和对流的总换热系数、弹性模量、屈服强度、切变模量、线膨胀系数和泊松比等<sup>[18]</sup>。其中,除了泊松比不随温度变化之外,其余参数均随温度的改变有不同取值,对于部分超出材料手册温度范围的高温数据,可参考已有数据通过插值外推法获取,见参考文献[18]。

模型中基体的尺寸为 200 mm × 30 mm × 4 mm(长×宽×高)。在模型的长度方向上进行单道激光熔覆,根据前期实验积累的数据资料,设置熔覆层横截面的形状如图 1(a)所示,上面是长为

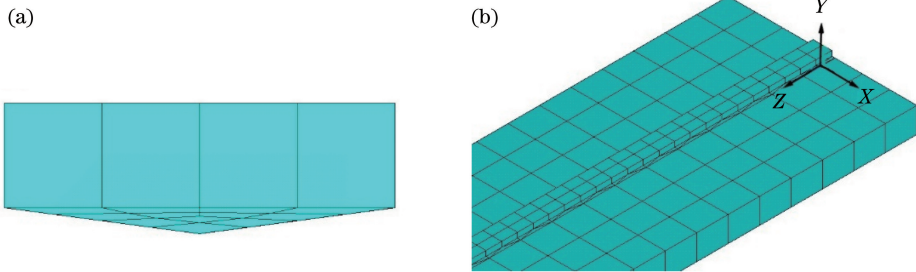


图 1 熔覆层横截面和网格划分。(a)熔覆层横截面;(b)网格划分

Fig. 1 Cross section of cladding layer and meshing. (a) Cross section of cladding layer; (b) meshing

采用生死单元技术<sup>[21]</sup>,在开始加载热源进行计算之前,将所有熔覆层单元均设定为“死”单元,然后根据时间参数和载荷步的向前推进,通过 Z 轴坐标值的循环累加逐步将“死”单元依次激“活”,纳入计算模型,从而实现熔覆层随激光光斑移动而逐渐生长过程的模拟。

对于热源模型,通过运用透射式光束积分镜并且辅助适当刻面,能够将激光器输出的基模高斯光束转换为宽带激光光束,其光斑形状为狭长的长方形,功率密度分布均匀,可显著提高加工效率<sup>[22]</sup>。近年来,随着大功率半导体激光器的发展,矩形光斑也越来越多地应用于激光制造过程中,而且由于模型采用了同轴送粉的方式,金属粉末在到达基体上时已处于熔融状态,所以选择以体积生热的方式来模拟激光能量的输入,生热率计算公式为

$$Q = \frac{\lambda P}{Avt}, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为激光能量的利用率,  $P$  为激光输出功率,  $A$  为熔覆层的横截面面积,  $v$  为扫描速度,  $t$  为每个载荷步的时间。

有限元模型的初始条件和边界条件主要体现在温度和力两个方面<sup>[23]</sup>。对于温度场,考虑初始温度

3 mm、宽为 0.8 mm 的矩形,下面是底边长为 3 mm、底边高为 0.2 mm 的等腰三角形。根据激光熔覆层横截面的形貌尺寸,在熔覆层的下面是基体熔化区,属于熔覆粉末和基体的冶金结合体<sup>[19]</sup>。因此,在模型中设计了熔覆层横截面下面的等腰三角形,以模拟实际激光熔覆过程中的基体熔化区域,提高模型数值模拟的计算精度。

在网格划分时,为保证计算精度,同时兼顾计算效率,对熔覆层及其相邻部位的网格进行了细化,而距离熔覆区域较远的部位则选用了较粗的网格进行划分<sup>[20]</sup>。有限元模型局部网格划分结果以及模型的笛卡尔坐标系如图 1(b)所示。

和换热系数。在模型进行激光熔覆之前,通过进行一次稳态分析,可将模型所有单元的初始温度设为室温(25 °C)。换热方式主要有对流换热和辐射换热,其中在熔池附近区域会有均  $10^3$  °C 的高温,此时模型主要以辐射的方式与周围环境进行热交换,因此换热系数会随着温度的改变而变化。考虑对流换热和辐射效应对温度场的影响,以更好地反映真实环境中的传热现象,将辐射效应转换成随温度变化的对流换热系数,得到一个综合考虑辐射和对流的总换热系数,总换热系数随温度的变化有不同的取值<sup>[24]</sup>(图 2),计算时按对流换热的形式加载到模型上。对于应力场,为防止模型产生刚体位移,将模型 Z 轴方向一个端面的节点施加全部方向的约束,形成一个固定端。

采用热-结构间接耦合非线性有限元分析方法对温度场与应力场进行数值模拟,即先建立单道激光熔覆的热传导模型,得到模型的温度场,然后在此基础上,通过单元转换,把热分析模型转换为结构分析模型,得到激光熔覆的应力场。在应力场计算中,通过激活牛顿-拉普森方法线性搜索选项,以得到较好的收敛解。

### 3.2 模型可行性分析

以激光功率 2800 W,扫描速度 10 mm/s,光斑



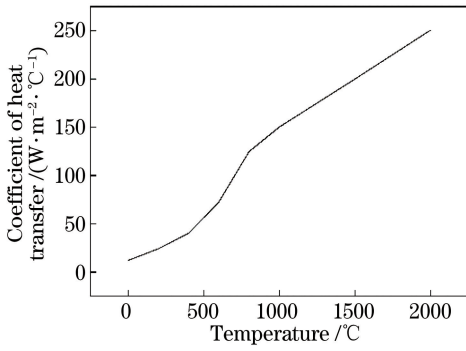


图2 总换热系数随温度的变化曲线

Fig. 2 Comprehensive coefficient of heat transfer varying with temperature

直径 3 mm 为例,对网格划分进行无关性分析。通过数值模拟得到几组不同网格划分情况下初始时刻温度场的最高温度,见表 1。

表 1 不同网格划分下模型温度场的最高温度

Table 1 The maximum temperature of model temperature field under different meshes

Number	Mesh size of cladding layer / m	Mesh size of matrix / m	Maximum temperature / °C
1	0.0010	0.0050	1603.70
2	0.0015	0.0050	1599.06
3	0.0020	0.0050	1583.30
4	0.0025	0.0050	1566.03
5	0.0030	0.0050	1551.76
6	0.0050	0.0050	1464.02

由表 1 可以看出,当熔覆层网格尺寸不大于 0.0030 m 时,其初始时刻温度场的最高温度值变化不大,在误差可接受范围内<sup>[25]</sup>。本文选取编号为 4 的网格划分方式。

根据几何特性,将熔覆层横截面划分为<sup>[26]</sup>熔覆区(CZ)、基体熔化区(MZ)、热影响区(HAZ)和基体(SZ),如图 3 所示。图中,  $H$ 、 $h$  分别为熔覆区和基体熔化区的高度,  $W$ 、 $w$  分别为熔覆区和基体熔化区的宽度。

同样以激光功率 2800 W、扫描速度 10 mm/s、光斑直径 3 mm 为例,通过数值模拟得到温度场,与相同工艺参数下激光熔覆实验试件金相组织形貌进行对比,如图 4 所示。316L 不锈钢的固相线和液相线温度分别为 1420 °C 和 1460 °C,而模型温度场最高温度达 1566.03 °C,高于基体材料熔点,可使熔覆材料与基体之间形成熔池,实现冶金结合,对应金相组织中的熔覆区和基体熔化区;温度场中的 900~1400 °C 温度区间对应金相组织中基体熔化区下面

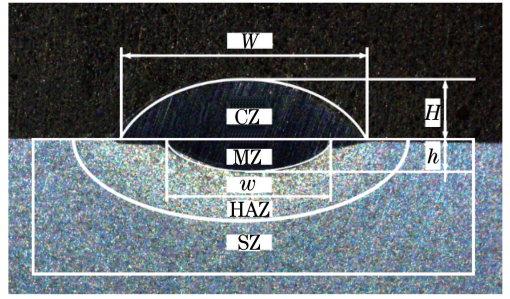


图 3 激光熔覆层横截面的几何特性示意图

Fig. 3 Geometry diagram of cross section of laser cladding layer

的热影响区;随着与热源距离增大,温度逐渐下降,对应金相组织中受热传导作用而升温的基体。由此可见,模型的温度场与试件金相组织形貌吻合较好。

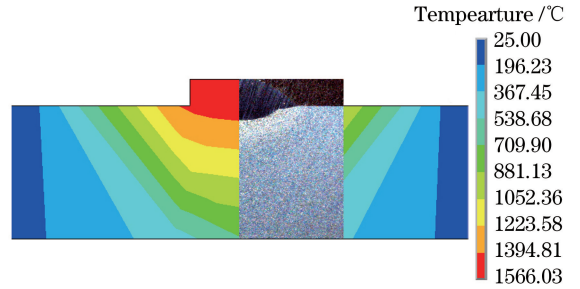


图 4 温度场与试件金相组织形貌对比

Fig. 4 Comparison between temperature field and metallographic structure of test piece

对于试件金相组织,在体式显微镜下测得  $H = 0.75$  mm,  $h = 0.40$  mm,高度合计为  $H_1 = 1.15$  mm;在温度场中,通过寻找熔点的方法,可得模型熔覆区和基体熔化区的高度合计约  $H_2 = 1.20$  mm。对比  $H_1$  和  $H_2$  可见,模拟结果与实验实测结果吻合较好。上述结果表明,所建立的 ANSYS 有限元模型是合理可行的,可用于后续数值模拟分析。

### 3.3 温度场分析

数值模拟得到激光熔覆温度场,如图 5 所示。在熔覆过程中,瞬态温度场最高温度在激光辐照位置,形成熔池,周围温度在热传导作用下根据距离辐照位置的远近分别有不同程度的升高,温度场的形貌呈后拖的偏椭圆状,偏向已形成熔覆层的一侧。这是因为熔池前侧温度较低,高温区域小,温度梯度大,而熔池后侧是熔覆区,经激光辐照,材料积累了热量,高温区域大,故熔池前面比后面的温度等值线密集;随着熔覆过程的进行,基体整体的温度逐渐升高;在冷却 20 s 后,温度场变化较大,最高温度约降低 1200 °C,温度分布趋于均衡。



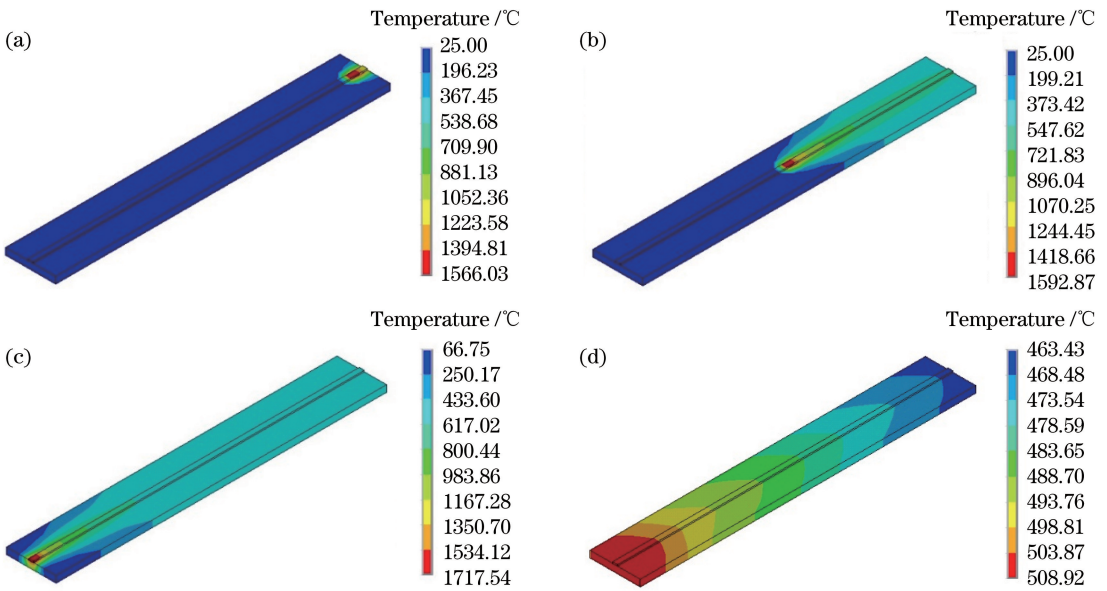


图5 激光熔覆温度场。(a)初始;(b)中间;(c)终点;(d)冷却 20 s

Fig. 5 Temperature fields of laser cladding. (a) Initial; (b) middle; (c) final; (d) cooling after 20 s

在熔覆层表面中间位置沿  $Z$  轴方向每隔 50 mm 取一个节点,共取 5 个节点,分别为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  和  $P_5$ ,采集每个节点的温度随时间变化的数据,得到温度-时间曲线,如图 6 所示。

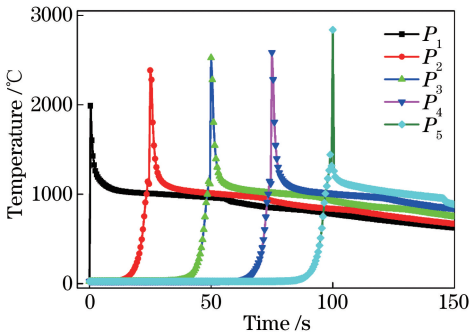


图6 温度随时间的变化曲线

Fig. 6 Curves of temperature versus time

由图 6 可知,熔覆层的温度变化历程可划分为由室温升至峰值温度和由峰值温度降至基体整体温度两个阶段。激光辐照瞬间,对应位置形成温度脉冲,在曲线上表现为一个峰值,两峰值间相差两节点激光扫描所需时间;基体初始温度低,吸热作用强,随着激光熔覆的进行,由于热传导和热量累积,温度逐渐升高,因此节点上的温度具有逐渐增大的峰值;升温过程由慢到快,激光辐照瞬间迅速拉升到峰值,之后在热交换和热传导的作用下,温度迅速降到 1000 °C 左右,最终缓慢回落为基体整体温度。整体上看,升温过程近似直线上升,降温过程近似双曲线的一支,可见,激光能量集中,热影响区域小,材料在

激光辐照下发生了瞬间加热和急速冷却的过程,这也是导致熔覆层裂纹的主要因素。

### 3.4 应力场分析

在移动式激光辐照作用下,熔覆件形成动态的温度梯度,不同温度区域具有不同的膨胀程度,形成残余应力<sup>[23]</sup>。根据基于第四强度理论的 Von Mises 准则,当材料应力大于其屈服强度时,会发生塑性变形以释放部分应力,导致翘曲变形,降低结构刚性和尺寸稳定性<sup>[27]</sup>。温度场分析之后,进行单元转换,在模型左端施加约束作为固定端,读入热分析结果作为应力场的分析载荷,求解得到 Von Mises 应力云图和位移云图,如图 7 所示。

由图 7 可知,残余应力主要集中在熔覆层与基体结合处,在固定端形成最大应力 1370 MPa。其原因是由于熔覆层和基体材料不同,其热物性参数不同,因温度变化发生了不同程度的膨胀,再加上固定端限制了材料的变形,从而造成应力集中;远离固定端的位置,应力通过变形得到释放,变形量最大达到 2.06 mm;沿激光扫描方向,变形量近似线性变化。

在模型上设置 3 条路径:路径 1 选取熔覆层与基体结合面的中间位置,沿着  $Z$  轴方向分布;路径 2 选取基体底面的中间位置,沿着  $X$  轴方向分布;路径 3 选取远离固定端的端面的中间位置,沿着  $Y$  轴方向分布。采集沿着每条路径的 Von Mises 应力数据,可得应力分布曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,沿路径 1 应力变化较大,且越靠近固定端,应力越大,最大值达 1000 MPa 以上,这是

由于非线性求解时固定端约束限制了节点移动,导致应力集中;沿路径 2 应力呈“W”状对称分布;沿路径 3 在距熔覆层表面 1 mm 位置附近应力变化大,

且形成峰值,这是因为熔覆层和基体的结合面易发生应力集中和突变,而接近基体底部,应力逐渐变小。

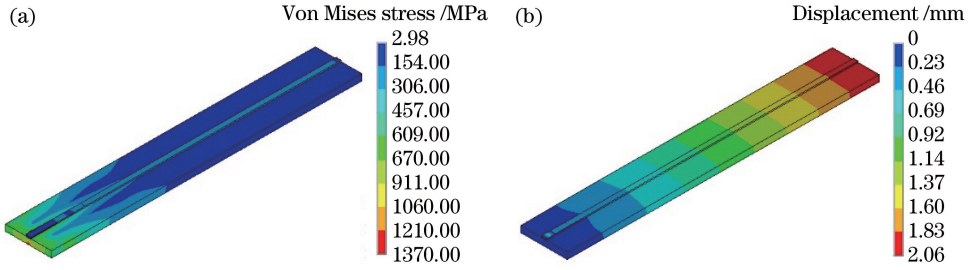


图 7 Von Mises 应力云图和位移云图。(a) Von Mises 应力;(b)位移

Fig. 7 Von Mises stress nephogram and displacement nephogram. (a) Von Mises stress; (b) displacement

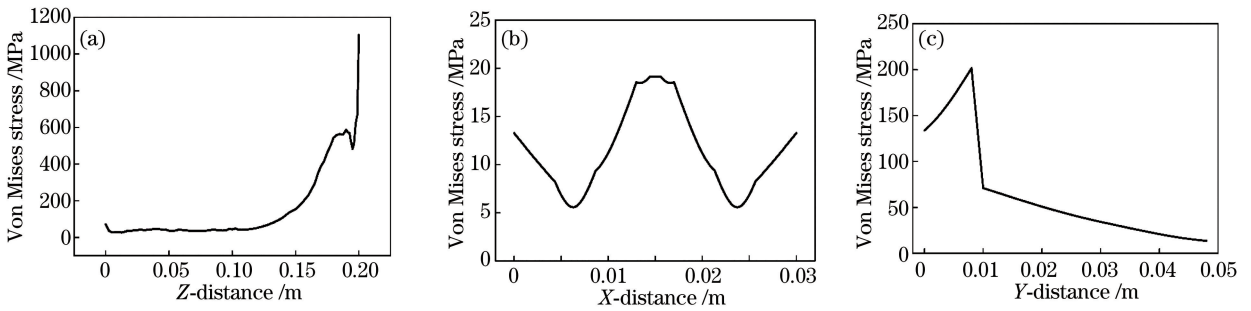


图 8 不同路径的应力分布曲线。(a)熔覆层与基体结合面中部沿 Z 轴方向;  
(b)基底中部沿 X 轴方向;(c)自由端中部沿 Y 轴方向

Fig. 8 Stress distribution curves along different paths. (a) Along the Z axis in the middle of the bonding surface of the cladding layer and the matrix; (b) along the X axis in the middle of the matrix undersurface; (c) along the Y axis in the middle of the free end

#### 4 激光工艺参数影响规律分析

度,得到 6 组激光工艺参数组合,记为 A、B、C、D、E 和 F,如表 2 所示。

在一定范围内选取不同的激光功率和扫描速

表 2 激光工艺参数分组和计算结果

Table 2 Grouping and calculation results of laser process parameters

Group	Laser power $P$ /W	Scanning speed $v$ /( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Average value of peak temperature / $^{\circ}\text{C}$	Temperature range after cooling 10 s / $^{\circ}\text{C}$	Maximum deformation /mm
A	2000	5	1871.15	606.15-771.70	2.32
B	2500	5	2107.80	721.20-900.84	2.64
C	2500	10	1442.58	451.25-509.75	1.39
D	3000	10	1713.93	550.70-625.95	1.63
E	3000	20	1313.43	307.11-331.77	0.93
F	3500	20	1389.66	348.94-377.13	1.03

数值模拟求解温度场和应力场,采集节点  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  和  $P_5$  的数据,得到不同激光工艺参数下的节点-温度时间曲线,如图 9 所示。计算每组激光工艺参数对应的 5 条温度-时间曲线的峰值平均值、模型冷却 10 s 后的温度区间以及模型的最大变形量,结果见表 2。

由图 9 可知,保持扫描速度不变,增大激光功率,可显著提高熔覆层和基体的温度,但变形量也随之加大;保持激光功率不变,增大扫描速度,单位面积获得的热量减少,导致熔覆层和基体的温度明显降低,变形量也有所减小;随着扫描速度增大,节点温度-时间曲线峰值逐渐增大的趋势显著变弱,在扫

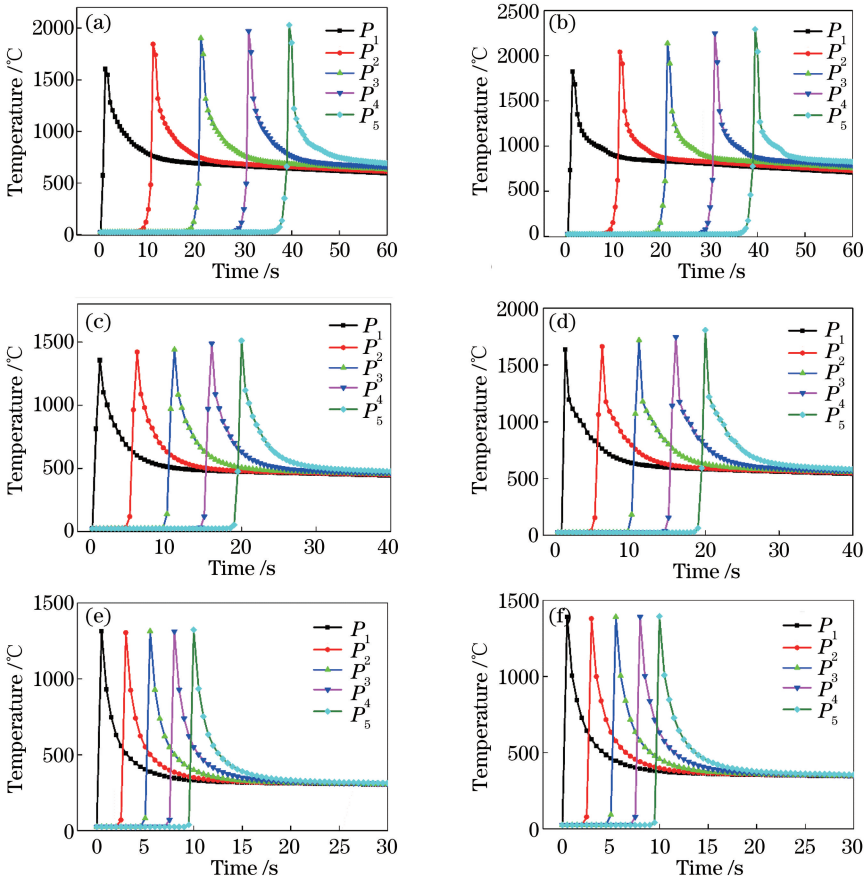


图 9 不同激光工艺参数组合下的温度-时间曲线。(a) A组;(b) B组;(c) C组;(d) D组;(e) E组;(f) F组

Fig. 9 Temperature-time curves for different laser processing parameters. (a) Group A; (b) group B; (c) group C; (d) group D; (e) group E; (f) group F

描速度增大到 20 mm/s 的情况下,峰值基本维持在一条水平线上,这是因为扫描速度增大之后,激光能够在较短时间内将基体待熔覆表面扫描完毕,而基体热量的传递需要一定时间,从而导致峰值逐渐增大的热量累积作用无法体现出来。

曲线,如图 10 所示。由图 10 可知,随着激光功率和扫描速度增大,中间部位的残余应力略有增大,但固定端应力集中的现象有所减弱,且应力分布更加均衡;从整体上看,相对于激光功率,扫描速度对应力分布情况的影响更大。

### 5 激光熔覆实验

选用 200 mm × 30 mm × 4 mm (长 × 宽 × 厚) 的 316L 钢板作为基材。实验前,先用砂纸打磨待熔覆表面,并用丙酮清洗干净。选用钴基合金作为熔覆粉末。实验采用德国通快公司 TruDisk 12003 型激光器,6 组激光工艺参数中的激光功率和扫描速度依据表 2 进行设置,光斑直径为 3 mm,送粉速率为 15 g/min。不同激光工艺参数下的熔覆试件形貌如图 11 所示。由图 11 可知,熔覆层形貌因激光工艺参数不同而具有差异,且因试件较薄,背面出现了明显烧结痕迹,并随激光功率的增大,烧结痕迹越明显,其中激光功率为 3500 W 时发生了熔池穿透现象,如图 11(b)中 F 组所对应的试件。

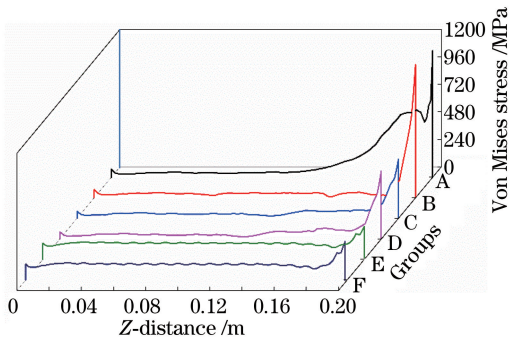


图 10 不同激光工艺参数下沿路径 1 的应力分布曲线

Fig. 10 Stress distribution curves of different laser processing parameters along path 1

由于模型容易在长度方向上发生翘曲变形,因此选取路径 1 研究不同激光工艺参数下的应力分布



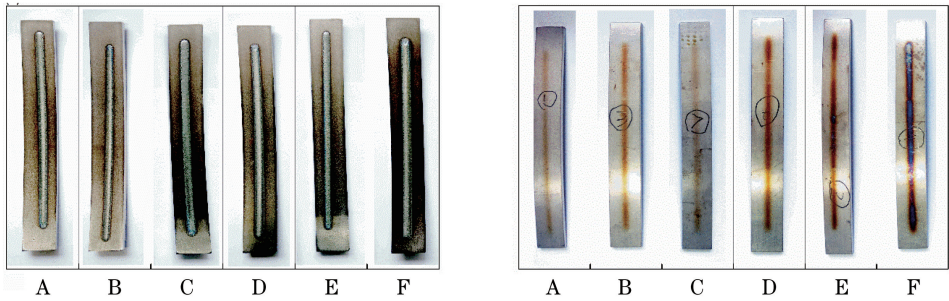


图 11 熔覆试件形貌。(a)正面;(b)背面

Fig. 11 Morphology of laser cladding specimens. (a) Front; (b) back

对试件翘曲变形程度进行测量,如图 12(a)所示;根据表 2 中工艺参数的分组情况进行数值模拟,并且将激光熔覆之后的冷却时间调整为 10 min,使

试件的温度能够回落到室温 25 °C 左右,然后将模型的变形量和实验数据进行对比,结果如图 12(b)所示。

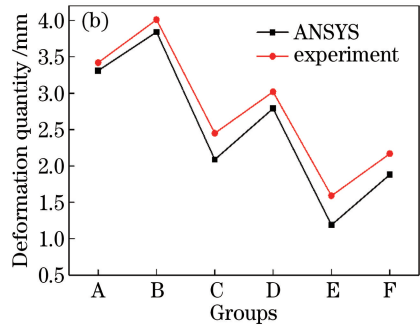
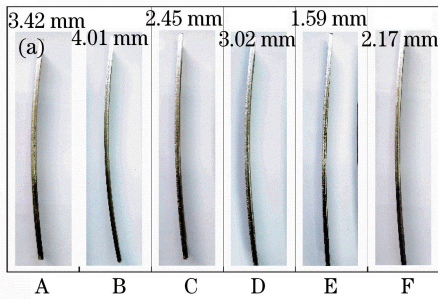


图 12 熔覆试件的变形。(a)试件照片;(b)变形量对比

Fig. 12 Deformation of cladding specimens. (a) Photos; (b) deformation comparison

由图 12 可知,试件的变形规律和数值模拟结果比较吻合,但由于激光熔覆影响因素的多样性和熔覆机理的复杂性,数值模拟难度较大,再加上激光设备的性能差异,以及操作和测量过程中的误差,从而导致实验数据和模拟数据之间存在一定的偏差。

激光熔覆的数值模拟和实验结果表明,激光工艺参数对温度分布和应力分布都有影响,进而影响试件的熔覆质量和变形情况;对于一些薄壁类零部件,可通过调节激光功率和扫描速度来提高熔覆质量、减小工件变形,以达到激光熔覆修复的目的。

由图 12(b)的变形量数据对比可知,熔覆实验的变形量均大于数值模拟的结果,产生了一致性偏差,6 组数据的平均偏差约为 18%。从模型的假设条件来看,可能是因为在数值模拟中忽略了熔池中液体的流动和表面张力,以及粉末和基体材料在熔化过程中因元素扩散导致的物理化学性质改变的影响,而在实际熔覆实验中,熔池中的液体具有一定的流动性和表面张力,并且由于粉末和基体是不同的材料,在高温熔化过程中,会产生元素扩散,金相组织和结构也会发生变化,导致物理化学性质发生改变,从而影响试件的变形;此外,在数值模拟中,试件设置的是一端固定的约束,但在实际熔覆实验中,试件的放置方式是一端夹持而另一端悬空,重力作用也会造成一定的影响。对此,需要后续做进一步的深入研究。

## 6 结 论

建立了单道激光熔覆的有限元模型,利用 ANSYS 生死单元技术对激光熔覆的温度场和应力场进行了数值模拟。对于温度场,在熔覆层表面沿激光扫描方向每隔 50 mm 取一个节点,得到的节点温度-时间曲线具有逐渐增大的峰值;升温过程近似直线,降温曲线近似双曲线的一支。应力沿不同路径存在不同的分布规律,在熔覆层和基体结合处易形成应力集中和突变;在一定参数范围内,相比于激光功率,扫描速度对应力分布的影响较大。对于应力引起的变形,在变形量的分布规律上,实验测量值和模拟结果比较吻合,但数据大小存在一定的偏差;后续可通过改进数值模拟条件、提高实验测量准确性等途径寻求解决方法。

## 参 考 文 献

- [1] Xu B S, Li E Z, Zheng H D, *et al.* The remanufacturing industry and its development strategy in China[J]. *Engineering Science*, 2017, 19(3): 61-65.  
徐滨士, 李恩重, 郑汉东, 等. 我国再制造产业及其发展战略[J]. *中国工程科学*, 2017, 19(3): 61-65.
- [2] Wei S G, Cheng D B, Sundin E, *et al.* Motives and barriers of the remanufacturing industry in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 94: 340-351.
- [3] Feng H, Li J F, Sun J. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0803003.  
封慧, 李剑峰, 孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0803003.
- [4] 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.
- [5] Li J Z, Li X F, Zuo D W, *et al.* Process test and temperature field simulation of the Al/Ti laser cladding coating above 7050 aluminum alloy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121403.
- [6] Torres Cruz A, de Lange D F, Medellín-Castillo H I. Comparative study of numerical models of the laser forming process[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S2): S29105.
- [7] Boutalbi N, Bouaziz M N, Allouche M. Influence of temperature-dependent absorptivity on solid surface heated by CO<sub>2</sub> and Nd:YAG lasers[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(3): 032004.
- [8] Farahmand P, Kovacevic R. An experimental-numerical investigation of heat distribution and stress field in single- and multi-track laser cladding by a high-power direct diode laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 154-168.
- [9] Mirzade F K, Niziev V G, Panchenko V Y, *et al.* Kinetic approach in numerical modeling of melting and crystallization at laser cladding with powder injection[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2013, 423: 69-76.
- [10] Li H, Wang Y F, Shi Z Q, *et al.* Simulation of laser cladding temperature field and flow field based on ellipse heat source model[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(2): 218-222.  
李豪, 王彦芳, 石志强, 等. 基于椭圆热源模型的激光熔覆温度场与流场数值模拟[J]. *应用激光*, 2017, 37(2): 218-222.
- [11] Liu H, Yu G, He X L, *et al.* Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 1203007.  
刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1203007.
- [12] Song J L, Li Y T, Deng Q L, *et al.* Research progress of laser cladding forming technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 29-39.  
宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14): 29-39.
- [13] Hua L, Tian W, Liao W H, *et al.* Fatigue life evaluation for laser cladding component based on non-linear continuum fatigue damage model[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0903006.  
华亮, 田威, 廖文和, 等. 基于非线性连续疲劳损伤的激光熔覆构件疲劳寿命评估[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903006.
- [14] Li M Y, Cai C B, Han B, *et al.* Numerical simulation of preheating on temperature and stress fields by laser cladding Ni-based ceramic coating[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(12): 197-203.  
李美艳, 蔡春波, 韩彬, 等. 预热对激光熔覆陶瓷涂层温度场和应力场影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(12): 197-203.
- [15] Liu Q C, Janardhana M, Hinton B, *et al.* Laser cladding as a potential repair technology for damaged aircraft components[J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2011, 2(3): 314-331.
- [16] Fang J X, Dong S Y, Xu B S, *et al.* Study of stresses of laser metal deposition using FEM considering phase transformation effects[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0503009.  
方金祥, 董世运, 徐滨士, 等. 考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0503009.
- [17] 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.
- [18] China Aeronautical Materials Handbook Editorial Committee. China aeronautical materials handbook [M]. 2nd ed. Beijing: China Standard Press, 2002: 510-526.  
中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002: 510-526.
- [19] Cao Y L. Research of microstructure and properties of laser cladding Co/RE on 316L stainless steel[D]. Jilin: Jilin University, 2015: 37-47.  
曹云龙. 316L 不锈钢表面激光熔覆 Co/稀土涂层组织与性能的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015: 37-47.
- [20] Gong X Y, Gao S Y, Xian S Y, *et al.* Warp deformation in single-track laser cladding based on temperature characteristics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017(10): 101410.  
宫新勇, 高士友, 咸士玉, 等. 基于温度特征的单道激光熔覆翘曲变形[J]. 激光与光电子学进展, 2017 (10):101410.
- [21] Li M Y, Han B, Cai C B, *et al.* Numerical simulation on temperature and stress fields of laser clad Ni-based coating [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(5): 25-28, 32, 114.  
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, 32, 114.
- [22] Liu Y C, Fan C F, Yin X L, *et al.* Temperature and stress analysis of dual-beam laser cladding on gray cast iron surface[J]. Applied Laser, 2014, 34(4): 288-293.  
刘衍聪, 范常峰, 尹晓丽, 等. 铸铁表面双光束激光熔覆温度场与应力场分析[J]. 应用激光, 2014, 34 (4): 288-293.
- [23] Wang K, Zhao J F, Pan H, *et al.* Influence of repair cross section on stress-field distribution in the nickel-based superalloy laser remanufacturing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 041402.  
王凯, 赵剑峰, 潘浒, 等. 工件形状对镍基高温合金激光再制造应力场分布的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 041402.
- [24] Wu J. An analysis of performance optimization criteria for a coupled radiative-convective heat transfer process[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(10): 1922-1925.  
吴晶. 辐射对流耦合换热过程性能优化准则分析 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(10): 1922-1925.
- [25] Li S, Cai X, Zhu L F, *et al.* Numerical simulation of wet submersible pump based on the single passage and structured grid [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 42(4): 580-586.  
李松, 蔡翔, 朱路飞, 等. 基于单流道和结构网格的湿式潜水泵数值模拟[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 580-586.
- [26] 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.
- [27] Kardas O O, Keles O, Akhtar S, *et al.* Laser cutting of rectangular geometry in 2024 aluminum alloy: thermal stress analysis [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64: 247-256.