

# 基于环形光内送粉激光熔覆温度场的数值模拟

石世宏 王 晨 徐爱琴 孙后顺 李洪远

(苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

**摘要** 针对“光束中空,光内送粉”的激光熔覆工艺方法,利用 Ansys 软件的参数化设计语言(APDL)建立了环形激光光斑连续移动加载的激光熔覆模型。通过计算该模型,可以掌握环形激光光内送粉激光熔覆过程中温度场的分布规律。计算结果表明,采用环形激光束加载时,熔池的最高温度区域的形状呈现出“马鞍形”。在基体纵切面上,熔池的高温区域分布呈不对称的“W”形,且高温区域主要分布在光斑中心往后;在基体横截面上,熔池的高温区域分布呈对称的“W”形,熔池中心温度低,两侧温度高,通过基体横断面等温线的分布能够判断熔覆层与基体的结合情况。位于扫描路径中心位置的点在激光束扫过其过程中会经历迅速升温、降温、升温、再迅速降温的急冷急热过程,且第二次升温高于第一次的温度值;位于光斑内外环之间的点在激光束扫过其过程中只有一次升温降温的过程,温度分布较均匀。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;环形激光;光内送粉;瞬态温度场

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0303002

## Temperature Field Numerical Simulation of Laser Cladding Based on Internal Powder Feeding through a Hollow Laser Beam

Shi Shihong Wang Chen Xu Aiqin Sun Houshun Li Hongyuan

(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China)

**Abstract** A numerical simulation model of laser cladding based on internal powder feeding through a hollow laser beam is set up by Ansys parametric design language (APDL). The laser beam of cladding is a continuous motion ring form according to the process method of "hollow laser beam and internal powder feeding". Temperature distribution of laser cladding process can be got by model calculation. The calculation results show that, when the hollow laser beam is used, the highest temperature area of the molten pool is the saddle-shaped. In the base plate longitudinal section, the distribution of molten pool high temperature is asymmetrical "W" shape, and high temperature area mainly distributes behind the flare center. In base plate cross section, the distribution of molten pool high temperature is symmetrical "W" shape, the temperature of the molten pool center is low, and the both side temperature of the molten pool is high, thus the combination between cladding layer and base plate can be judged by the isothermal diagram. The temperature in the center of laser scanning undergoes twice sharp quenching and snap heat processes. It goes up and down rapidly first, and then goes up and down again. The second rising temperature is higher than the first one during the scanning. The temperature on both edges of the scanning tracks has only once sharp quenching and snap heat process, and the distribution of temperature is more uniform.

**Key words** laser technique; laser cladding; hollow laser beam; internal powder feeding; transient temperature field

**OCIS codes** 350.3850; 140.3390; 350.3390

### 1 引 言

激光熔覆是一种通过在基材表面添加熔覆材料,并利用高能密度的激光进行辐照,使之与基材表

面薄层一起熔凝,从而在基材表面形成添料熔覆层的表面改性技术<sup>[1,2]</sup>。按送粉工艺的不同,激光熔覆可以分为粉末预置法和同步送粉法两类。同步送

**收稿日期**: 2011-09-19; **收到修改稿日期**: 2011-10-28

**基金项目**: 国家自然科学基金(11172191,10972150,61078019,50975187)和苏州市工业攻关项目(SYG201036)资助课题。

**作者简介**: 石世宏(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事激光快速成形方面的研究。

E-mail: shishihong@suda.edu.cn

粉式激光熔覆具有易实现自动化控制、激光能量吸收率高、无内部气孔等优点,具有广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。

由于激光熔覆过程中熔池具有升温快、温度高的特点,试验方法获得激光熔覆过程中的温度场分布较困难。目前国内外众多学者采用数值计算方法,运用 Ansys 软件对激光熔覆过程的温度场分布规律进行了大量的研究工作<sup>[3~6]</sup>。但研究主要是针对采用实心激光光斑的光外送粉方式进行的激光熔覆。本文提出了一种“光束中空,光内送粉”的激光熔覆工艺方法,通过光路转换装置将激光器产生的圆形光斑进行先扩束、后聚焦,在非聚焦点位置得到呈圆环状分布的激光光斑<sup>[7~10]</sup>。本文利用 Ansys 软件,采用生死单元技术模拟熔覆单元的生长过程,并利用 Ansys 参数化设计语言 (APDL) 建立一个三维 TABLE 型数组,实现环形激光束在基体表面的移动加载,模拟环形激光光内送粉激光熔覆的温度场分布;同时进行了激光熔覆试验,对模型的可靠性进行验证,证明环形激光光内送粉的优越性。

## 2 环形激光光内送粉激光熔覆

### 2.1 环形激光产生机理

环形激光产生机理如图 1 所示,该方案是利用圆锥-圆环双反射镜技术,将入射的实心圆形激光束在喷头装置中进行扩束、聚合等光学变换,使投射至成形表面上的聚焦激光束内部形成一中空锥形的无光区。其中锥镜由 3 根横梁支撑在光头内部,环镜的中心。送粉管、保护气管由横梁的下方送进光头,在横梁的遮挡下不会被激光照射。横梁的内部通冷却水进行冷却。送粉管进入无光区后垂直向下输送,与圆环锥形聚焦光束同轴线。送粉管中的粉末在气载或重力作用下在光束中空区与光束同轴送入

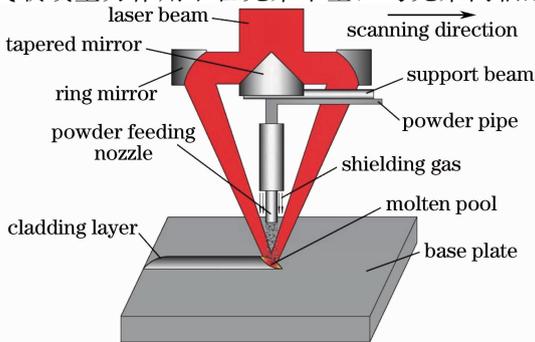


图 1 环形激光光内送粉激光熔覆示意图

Fig. 1 Schematic of laser cladding with coaxial inside-beam powder feeding

加工面上的聚焦光斑中<sup>[7]</sup>。

该方案充分实现了粉、气、光真正意义上的同轴,且可以实现光斑略大于粉斑的熔覆工艺,不仅消除了光外送料出现的方向性问题,而且解决了熔道粘粉现象,提高了熔覆层成形质量。粉粒由粉管下部喷嘴喷出后所受自身惯性力、气载压力、重力的作用方向一致,运动轨迹为直线状,因此,粉束垂直下落至加工面上的光斑中,准确且发散角小,粉束截面上粉粒密度分布比较均匀,可以满足离焦时激光熔覆的需要。同时粉束处于光束内部而不与光束发生干涉,只在环锥形聚焦光束的近焦点处才进入光束,入光时间短,烧损少,造成挡光作用小,且被激光照射的粉末也同样落入熔池。较之光外送粉,光内送粉方式可有效提高粉末利用率,利用率能够达到 68% 以上<sup>[10]</sup>。另外,光路中的圆环锥形聚焦光束中空体积大,便于安装刚性好的粗大送粉管,可以更换不同大小喷嘴和喷出粗细不同的粉末。

### 2.2 环形激光扫描线宽方向能量分布

图 2 为研究所用环形激光在离焦情况下照射有机玻璃得到的光斑图像,由于 3 根锥镜支撑横梁的遮挡(如图 1 所示),环形光斑被均匀分成了 3 段,各段之间的空隙很小,对能量分布的影响可以忽略不计。并且研究中采用的是多阶激光模式,这是因为多模激光的能量分布较均匀,从而使得处于光斑照射范围内的金属粉末受热比较均匀,光斑边缘处的粉末更易熔化,有利于成形精度较高的金属件。因此可以认为在同一径向平面内,环形激光束的分布为一能量均匀的环形光斑。



图 2 环形激光光斑

Fig. 2 Ring laser flare

然而在激光熔覆过程中,激光光斑是一个移动的光源,沿着某一个方向进行扫描,形成一个移动的熔池,从而形成熔道。对于环形激光光斑扫描时,如图 3(a) 所示,任意一点  $H(x, y)$  所吸收的能量是弦  $AD$  上所有能量的总和,而弦  $AD$  上能量的总和为对  $AB$  段能量积分的 2 倍,则线宽方向吸收的光能为

$$w(y) = \begin{cases} 2 \int_{-\sqrt{R^2-y^2}}^{\sqrt{R^2-y^2}} I(x,y) dx; & 0 \leq |y| < r \\ 2 \int_0^{\sqrt{R^2-y^2}} I(x,y) dx; & r \leq |y| \leq R \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $R$  为外圆半径;  $r$  为内圆半径;  $I(x,y)$  为环形激光光斑的能量密度。

根据(1)式绘图可以发现,采用环形激光进行激光熔覆过程中,熔道线宽方向吸收光能的分布曲线呈“马鞍形”,如图 3(b)所示。

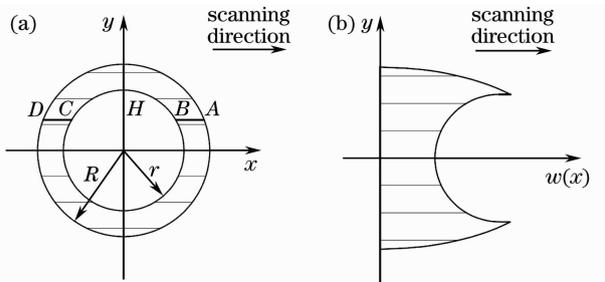


图 3 环形光斑示意图。(a)光斑截面;(b)扫描线宽方向吸收能量

Fig. 3 Schematic of ring laser flare. (a) Cross-section of ring laser; (b) absorb energy of scanning direction

在激光熔覆快速成形过程中,扫描线宽方向吸收的光能是影响熔覆件质量的关键因素。圆形激光光斑能量是呈“高斯形”分布的,所以在扫描线宽方向上吸收的光能也是呈“高斯形”分布的,即中心能量极高,由内到外逐渐降低。而熔道外侧热传递快,中心具有热积聚效应,这就会造成熔道外侧能量不足而中心产生过烧的现象。这种情况不利于形成完整的熔覆层,也不利于熔覆层与基体结合边界处形成完全冶金结合层。而环形激光光斑扫描线宽方向吸收的能量呈“马鞍形”分布,因此可有效改善熔覆层边界结合处熔覆层和基体不能形成完全冶金结合层的情况;同时,激光热作用时的热积聚效应使得光斑中心位置的热量不会很低,能使熔覆层较为平坦。

### 3 环形激光熔覆模型的建立

采用环形激光进行送粉激光熔覆时,粉末在近焦点处会被激光照射,且被照射的粉末同样落入熔池(如图 1 所示),因此模型中不考虑粉末对激光的遮挡。另外激光熔覆是一个极快速的熔化、凝固过程,而且熔池的尺寸相对于整个熔覆表面一般很小,

熔覆过程中熔池大小基本保持恒定,所以为了计算方便,在建立模型时作如下简化:激光熔覆过程中熔覆层生长速度与激光扫描速度相等;将激光熔覆熔道表面看成平面;材料为各向同性,经典的传热理论适用于激光与材料的相互作用并忽略温度对材料密度的影响;忽略气体物质对入射激光输入的影响。

#### 3.1 材料属性的计算

激光熔覆温度场的计算属于非线性瞬态传热问题,材料的导热率、比热都随温度发生变化,且存在一定的规律。因此在计算中设定几个特殊温度点材料特性的特征值,然后根据该材料的特征值的变化规律利用差值法对其他温度点的特征值进行计算<sup>[11]</sup>。模型中基体的材料为 45# 钢,熔覆的粉末为铁基合金粉 Fe313。

另外模型计算中通过定义材料随温度变化的热焓  $H$  来考虑熔化和凝固潜热,即

$$H = \int \rho c(T) dT, \quad (2)$$

式中  $\rho$  为材料密度,  $c(T)$  为材料不同温度时的比热容。

#### 3.2 模型建立与网格划分

光内送粉激光熔覆几何模型及网格划分如图 4 所示,其中基体尺寸为  $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。单道熔覆层高度为  $0.5 \text{ mm}$ ,宽度为  $3 \text{ mm}$ ,长度为  $40 \text{ mm}$ 。为了简化模型,提高计算速度,模型中忽略了圆角等细部。模型采用六面体单元进行网格划分,由于激光扫描区域温度梯度较大,故熔道附近对网格进行细分,基体远离熔道的区域网格逐渐变大。

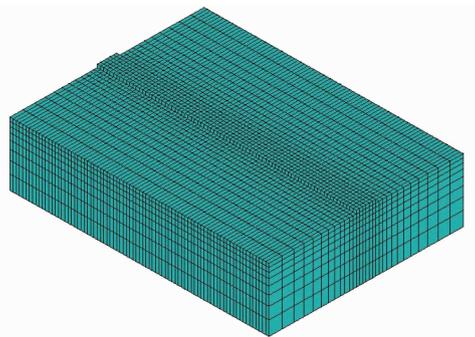


图 4 光内送粉激光熔覆网格模型

Fig. 4 Mesh model of internal powder feeding laser cladding

#### 3.3 边界条件的处理

激光熔覆有限元模型的边界条件由三部分组成,分别为:环形激光束作用区的集中热载荷;基体与空气接触表面的自然对流换热以及基体的下表面与工作台之间的热传导。模型中利用 Ansys 参数

化设计语言建立一个三维 TABLE 型数组,实现激光光束在基体表面的移动加载。其中激光束作用环形区域中心点在基板表面的位置  $L$  可通过

$$L = L_0 + V \times t \quad (3)$$

确定。(3)式中,  $L_0$  为激光束起始位置;  $t$  为激光束扫描时间;  $V$  为激光束扫面速度。

确定了  $t_1$  时刻环形激光束中心点在基板表面位置  $L_1$  后,通过 APDL 参数化设计语言在以  $L_1$  为圆心,  $r$  为内径,  $R$  为外径的环形区域内加载热流密度载荷。由于激光束能量为均匀分布,则激光束作用在基体表面的功率密度  $q_w$  为

$$q_w = \eta P / [\pi(R^2 - r^2)], \quad (4)$$

式中  $\eta$  为基体对激光的吸收率;  $P$  为激光功率。

工作台的尺寸远远大于基体尺寸,在沉积过程中其温度基本不变,取为  $15\text{ }^\circ\text{C}$ 。模型中基体的其他表面与空气进行自然对流换热:

$$-K(\nabla T \cdot n) = h(T - T_a), \quad (5)$$

式中  $h$  为表面换热系数;  $n$  为表面法线方向;  $K$  为导热系数;  $T_a$  为环境温度。

#### 4 结果分析与试验验证

采用以上模型按时间和路径顺序不断激活熔覆层有限单元,然后对熔覆层单元施加激光能量密度载荷,载荷作用时间为激光扫描单元所需时间,模拟熔覆层生长及温度场分布。图 5(彩图见电子版)为激光功率  $2500\text{ W}$ ,激光扫描速度  $3\text{ mm/s}$ ,环形光斑外径  $3\text{ mm}$ ,内径  $2\text{ mm}$  时,基体表面熔池温度场的分布云图。由图 5 可见移动中的熔池的温度场分布呈彗星状,熔池前部温度梯度较大,同时熔池中最高温度区域不在激光光斑中心,而是稍稍滞后于光斑中心。另外观察熔池中最高温度分布可以发现,采用环形激光束加载时,熔池的最高温度区域(图 5 中

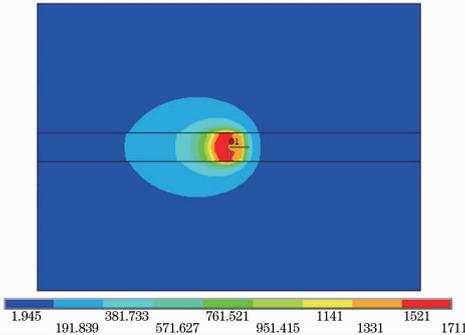


图 5 光内送粉激光熔覆温度场云图

Fig. 5 Nephogram of temperature in internal powder feeding laser cladding

的红色区域)的形状不同于实心光斑熔覆时的椭圆状<sup>[5]</sup>,而是呈现出“马鞍形”,中心和外围的温度分布较均匀,与环形激光能量分布的理论分析相吻合。图 6 是基板纵切面温度场分布的等值线图。由图 6 可以发现熔池的后部温度较高且熔深较大,高温区域的温度等值线呈“W”形,有两个深谷,分布不对称,熔池后部深谷较前部深。

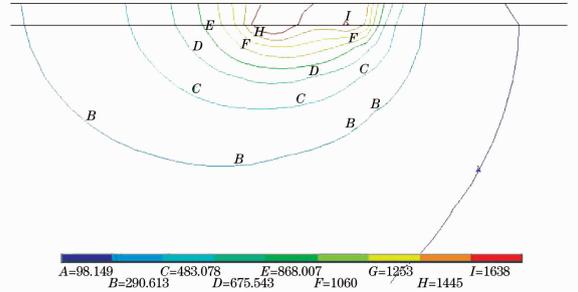


图 6 基板纵切面温度场分布等值线图

Fig. 6 Isothermal of temperature in base plate longitudinal section

图 7 为激光扫描速度  $3\text{ mm/s}$ ,环形光斑外径  $3\text{ mm}$ ,内径  $2\text{ mm}$  时,不同激光功率下光斑中心部位基板横截面的温度场分布等值线图,由图 7(a)~(c)可以看出基体表面高温区域的温度等值线呈对称的“W”形,两侧温度高,中间温度低,而随着深度的增加,温度逐渐降低,且温度等值线的形状逐渐趋向于半圆形,这是因为基体表面环形激光束的加载作用使基体表面高温区域温度的分布呈现两边高中间低的“马鞍形”,随着深度的增加,表面激光束的直接作用降低,基体内部的热传导作用增强,因此温度等值线逐渐趋向于半圆形。另外,可以通过观察基体和熔道的界面处的温度是否达到  $45\text{ }^\circ\text{C}$  钢的熔点温度  $1350\text{ }^\circ\text{C}$ ,来判断熔覆过程中能否形成稳定的熔池,以及熔道和基体是否形成良好的冶金结合。

比较图 7(a)、(b)和(c)可以发现,激光功率的大小对基体横断面的温度场数值分布影响很大。如图 7(a)所示,当激光功率为  $1500\text{ W}$  时,熔池最高温度为  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ ,达到  $45\text{ }^\circ\text{C}$  钢的熔点,且高温区域主要分布在熔道的两侧,界面处熔道中间的温度为  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  左右,没有达到  $45\text{ }^\circ\text{C}$  钢的熔点,因此可以判断激光功率为  $1500\text{ W}$  时,基体表面不能形成稳定的熔池,光斑两侧会有少许粉末熔覆,形成熔道,中间没有熔覆层。采用相同的工艺参数进行环形光内送粉激光熔覆试验,得到图 8(a)所示的激光功率为  $1500\text{ W}$  时熔道的形貌图,可以看出熔道分成了左右两部分,中间没有形成熔覆层,与模型计算完全相符。

图 7(b)为激光功率 2500 W 时基板横断面温度场分布等值线图,可以看出 1350 °C 的等温线呈平缓的“W”形,两侧熔深稍稍大于中部,且处于界面以下,可以判断熔覆层与基板结合良好,熔池最高温度为 1700 °C,熔道表面不会产生灼伤。其试验所得熔道形貌图如图 8(b)所示,熔道表面光亮平整,成形质量较高;其试验所得熔道横断面图如图 9 所示,熔深两侧较大,中间较小,熔覆层与基板形成良好的冶金结合,且结合处形状与仿真结果中的 1350 °C 等温

线基本相同。

图 7(c)为激光功率 3500 W 时基板横断面温度场分布等值线图,可以看出熔池最高温度达到 2400 °C 以上,熔池温度过高,熔道表面会产生灼烧,且 1350 °C 等温线在界面以下较深部位,因此可以判断熔深较大,熔覆层稀释率较大。其试验所得熔道形貌如图 8(c)所示(彩图见电子版),熔道表面暗淡无光,可见黄色的灼斑,熔道略有凹陷,不够饱满,与仿真分析完全相符,验证了模型的可靠性。

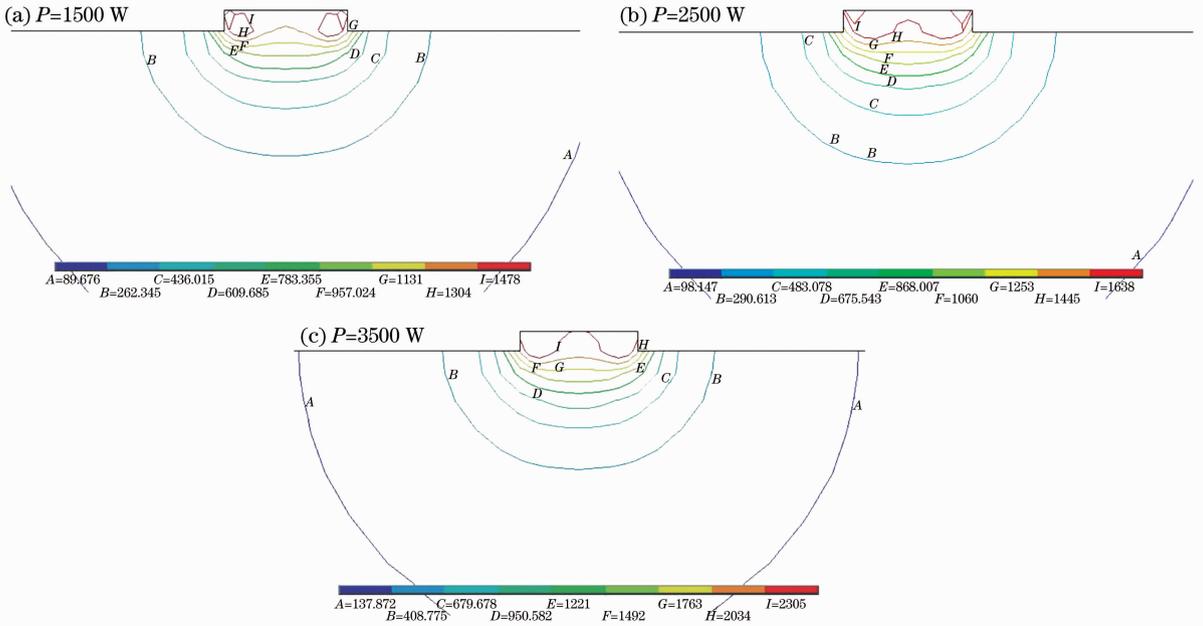


图 7 不同功率时基板横截面温度场分布等值线图

Fig. 7 Isothermal of temperature in base cross section at different laser powers

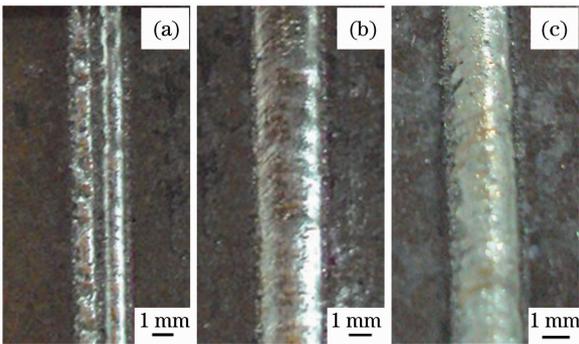


图 8 不同激光功率时的熔道表面形貌。

(a)  $P=1500\text{ W}$ ; (b)  $P=2500\text{ W}$ ; (c)  $P=3500\text{ W}$

Fig. 8 Cladding layer surface morphology at different laser powers. (a)  $P=1500\text{ W}$ ; (b)  $P=2500\text{ W}$ ; (c)  $P=3500\text{ W}$

图 10 为基板表面定点位置示意图。由图 10 可见,沿激光扫描方向依次取 1,2,3,4 四个点,它们在竖直方向上处于环形光斑扫描路径的中心线上,水平方向点 1,2,3,4 相互间隔 10 mm,依次排开,其

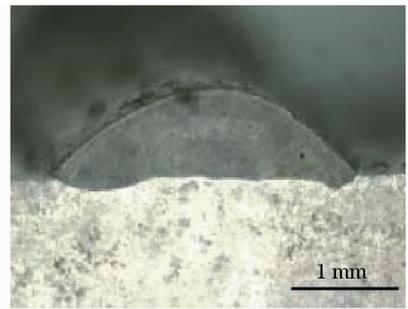


图 9 功率为 2500 W 时的熔道横断面

Fig. 9 Cross section of cladding layer at 2500 W laser power

中点 1 距离基板左侧面 5 mm;在垂直激光扫描路径的方向上依次取 5,6 两个点,其中点 5 水平方向距离基板左侧 20 mm,位于基板中央,竖直方向处于光斑中心线上,而点 6 位于点 5 正下方 1.25 mm 处,竖直方向处于环形光内外环之间的扫描路径上,靠近光斑边缘。

图 11 为激光功率 2500 W,扫描速度为 3 mm/s,

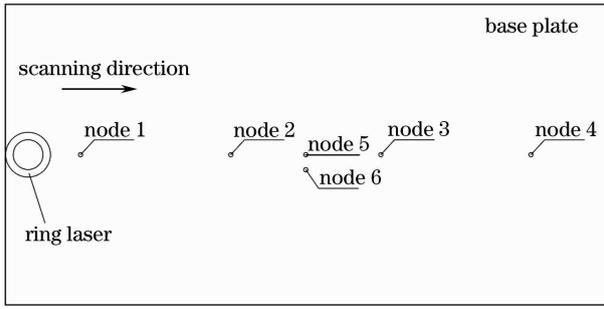


图 10 基板表面定点位置示意图

Fig. 10 Fixed nodes on base plate surface

环形光斑外径 3 mm, 内径 2 mm 时, 基板表面定点温度随时间的变化情况。沿激光扫描方向的 1, 2, 3, 4 点温度随时间的变化曲线如图 11(a) 所示, 当环形激光的前沿扫描到点 1 时, 该点位置的温度迅速升

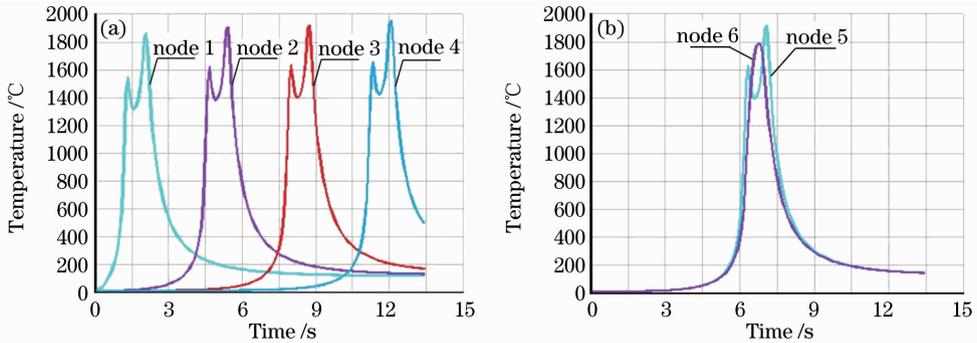


图 11 基板表面定点温度随时间变化曲线。(a)沿扫描方向;(b)垂直扫描方向

Fig. 11 Temperature of the different points at different time. (a) Scanning direction; (b) vertical direction of scanning

图 11(b) 显示了处于环形光扫描路径中心位置的点 5 和近边缘位置的点 6 在激光束扫描过程中的温度变化情况。从图 11(b) 可以看出点 5 的温度变化与点 1 基本相似, 但点 6 却有明显的不同, 由于点 6 处于环形光的内外环之间, 在环形激光束扫过它的过程中, 一直被激光束照射, 故其温度只有一个极值, 期间没有下降的过程。通过图 11(b) 发现点 6 位置的最高温度低于点 5 位置的最高温度。这是因为在激光束扫描时点 5 处于热包围当中, 热传导作用使其温度仍高于边缘位置的点 6, 但环形激光光斑扫描线宽方向吸收能量的“马鞍形”分布可有效降低熔覆层中心和边缘的温差, 从而改善熔覆层边界结合处熔覆层和基体不能形成完全冶金结合层的情况。

## 5 结 论

利用 Ansys 软件参数化设计语言建立了一个环形激光光斑连续移动加载的激光熔覆模型。通过该计算模型, 可以掌握环形激光光内送粉激光熔

高, 达到 1500 °C 以上, 基体开始熔化; 当环形光的前半边光环扫过点 1 后, 该点处于环形光斑中心部位, 没有激光能量的加载, 该处的温度会有少许下降, 降到 1350 °C 左右; 随着激光束的扫描运动, 环形激光束的后半边光环作用到该点位置, 因此点 1 位置的温度进行了第二次快速升高, 且由于能量的累积作用, 这次的最高温度高于前半边光环的升温效果, 最高温度达到了 1800 °C 以上; 之后点 1 位置的基体温度迅速下降, 反映了激光束加载是急热急冷的过程。当激光束扫描过点 2, 3, 4 时, 其温度的变化与点 1 基本相似, 但最高温度值依次升高, 这是因为热传导的作用使基板的初始温度升高, 从而使后一位置的最高温度高于前一位置。

覆过程中温度场的分布规律。计算结果表明, 采用环形激光束加载时, 熔池的最高温度区域的形状呈现出“马鞍形”; 基体纵切面上熔池的高温区域分布呈不对称的“W”形, 且高温区域主要分布在光斑中心往后; 基体横截面上熔池的高温区域分布呈对称的“W”形, 熔池中心温度低, 两侧温度高, 通过基体横断面等温线的分布能够判断熔覆层与基体的结合情况, 且与试验所得结果吻合较好, 验证了模型的可靠性; 另外通过分析界面定点在激光熔覆过程中的温度变化曲线发现, 位于扫描路径中心位置的点在激光束扫过其过程中会经历迅速升温、降温、升温、再迅速降温的急冷急热过程, 且第二次升温高于第一次的温度值, 位于光斑内外环之间的点在激光束扫过过程中只有一次升温降温的过程, 其最高温度与光斑中心位置的温差不大, 温度分布较均匀, 体现了环形激光光斑扫描线宽方向吸收能量的“马鞍形”分布可有效降低熔覆层中心和边缘的温差, 改善熔覆层边界结合处熔覆层和基体不能形成完全冶金结合层的情况。

## 参 考 文 献

- 1 Guan Zhenzhong. Laser Processing Technical Manual [M]. Beijing: China Metrology Press, 1998. 275  
关振中. 激光加工技术手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998. 275
- 2 Zhang Dongyun, Wang Ruize, Zhao Jianzhe *et al.*. Latest advance of laser direct manufacturing of metallic parts [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 18~25  
张冬云, 王瑞泽, 赵建哲等. 激光直接制造金属零件技术的最新进展[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 18~25
- 3 Zhao Hongyun, Shu Fengyuan, Zhang Hongtao *et al.*. Numerical simulation on temperature field of laser cladding based on birth-death element method [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(5): 81~84  
赵洪运, 舒凤远, 张洪涛等. 基于生死单元的激光熔覆温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2010, **31**(5): 81~84
- 4 Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Steve Corbin. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection; effects of laser pulse shaping on the process [J]. *Opt. Lasers in Engng.*, 2004, **41**(6): 849~867
- 5 Xi Mingzhe, Yu Gang. Numerical simulation for the transient temperature field of 3D moving laser molten pool [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1527~1532  
席明哲, 虞钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟[J]. 中国激光, 2004, **31**(12): 1527~1532
- 6 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Temperature/stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1908~1912  
贾文鹏, 林鑫, 陈静等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1908~1912
- 7 Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun *et al.*. Internal Powder Feeding Technology and Nozzle through a Hollow Laser Beam in Laser Processing Forming Manufacturing [P]. Chinese Patent, CN200610116413.1, 2006  
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[P]. 中国专利, CN200610116413.1, 2006
- 8 Shi Shihong, Fu Geyan, Li Long *et al.*. Realization and research of laser cladding with method of internal wire feeding through a hollow laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 266~270  
石世宏, 傅戈雁, 李龙等. 中空激光光内同轴送丝熔覆工艺的实现及其试验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 266~270
- 9 Li Hongyuan, Shi Shihong, Fu Geyan *et al.*. Control of process parameters of reducing solid of revolution with coaxial inside-beam powder feeding accumulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0803012  
李洪远, 石世宏, 傅戈雁等. 光内送粉激光熔覆堆积变径回转体工艺参数的控制[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0803012
- 10 Shi Gaolian, Shi Shihong, Wu Shaohua *et al.*. Research on effective utilization rate of power in inside-laser coaxial powder feeding laser cladding and rapid prototyping process [J]. *Hot Working Technology*, 2010, (7): 152~161  
石皋莲, 石世宏, 吴少华等. 光内送粉激光熔覆快速成形粉末利用率实验研究[J]. 热加工工艺, 2010, (7): 152~161
- 11 Fang Kunfan. Engineering Materials Manual-Black Metal Materials Volume [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 2002. 186~187  
方昆凡. 工程材料手册-黑色金属材料卷[M]. 北京: 北京出版社, 2002. 186~187

栏目编辑: 宋梅梅