

激光多层涂敷过程中的温度场测量与数值模拟*

李廷民¹⁾ 刘振侠²⁾ 杨海欧²⁾ 林鑫²⁾ 黄卫东²⁾ 李建国¹⁾

1) 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200030

2) 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072

摘要 用多路热电偶对激光多层涂敷过程的温度场进行了实时测量, 测量结果显示在激光多层涂敷过程中, 工件的温度呈近似周期性的变化; 在最初的两层时, 基材内部的温度变化很剧烈, 随着涂敷层数的增加, 基材内部的温度逐渐上升, 同时温度变化趋于平缓. 采用测量数据作为边界条件对工件的温度场进行了有限差分数值模拟, 研究表明, 激光多层涂敷过程中熔池内的温度梯度在 10^5 — 10^6 K/m 数量级, 在工艺参数保持不变的情况下, 激光熔池的尺寸随着涂敷层数增加而增大, 而温度梯度则随之减小.

关键词 激光多层涂敷, 温度场, 测量, 模拟

中图分类号 O532.25, O242.2

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2003)05-0521-05

MEASUREMENT AND SIMULATION OF TEMPERATURE FIELD DURING MULTI-LAYER LASER CLADDING

LI Yanmin¹⁾, LIU Zhenxia²⁾, YANG Haiou²⁾, LIN Xin²⁾, HUANG Weidong²⁾, LI Jianguo¹⁾

1) School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

2) State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Correspondent: LI Yanmin, Tel: (021)62932569, E-mail: tauruslym@yahoo.com.cn

Supported by National Key Basic Research and Development Programme of China (No. G2000067205-3)

Manuscript received 2002-08-14, in revised form 2002-11-04

ABSTRACT The temperature field of multi-layer laser cladding was *in situ* measured by multiple thermal couples. It was found that during multi-layer laser cladding, the temperature in the specimen varies almost periodically and in the first two layers, the temperature varies very sharply. As the layers were added on, the temperature of the substrate increases and varies more gently. By using the measured data as the boundary conditions, the temperature field of the specimen was numerically calculated through finite difference method. The calculation shows that the temperature gradient in the laser melted pool is about 10^5 — 10^6 K/m. In addition, for the same processing parameters, the size of the melted pool increases and the temperature gradient decreases.

KEY WORDS multi-layer laser cladding, temperature field, measurement, numerical simulation

温度场作为激光加工过程中的一个重要参量, 不仅直接影响着加工过程本身, 还会对材料的性能产生显著影响, 因此, 研究激光加工过程中的温度场变化情况并对其加以控制一直是该领域内的重点研究内容之一. 从 20 世纪 70 年代开始, 众多的研究者们对激光加工过程的温度场进行了较为深入的研究, 得到了很多有价值的结果^[1-9], 如 Kou 等^[8] 建立了运动 Gauss 热源三维准稳态激光熔化熔池流体流动及传热模型, 并考虑了浮力和表面张力梯度的影响; Mazumder 等^[7] 则建立了关于熔池内对流

的瞬态模型. 由于激光熔池是一个极快速的熔化、凝固过程, 而且熔池的尺寸一般很小, 其温度场变化又极为剧烈, 从而为熔池的温度场测量带来了很大困难, 因此, 大多数的研究都是通过数值模拟为主, 实验验证为辅的方式进行的. 特别是随着计算机的飞速发展, 使数值模拟成为激光熔池温度场研究的主要方法, 不断被发展和完善.

近年来, 随着一些高温测量技术的发展与应用, 激光加工过程的温度场测量工作逐渐引起了人们的重视, 相继有学者开展了此方面的研究工作, 如 Jehnming^[10] 采用红外高温计测量了激光涂敷过程的熔池附近的温度场变化, Atwood 等^[11] 则采用红外高速摄影的方法对涂敷过程的温度场进行了研究. 这些结果在一定程度上揭示了激光涂敷过程试样温度场的变化规律, 有力地推动了激光涂敷过程的温度场研究进展.

* 国家重点基础研究发展规划资助项目 G2000067205-3

收到初稿日期: 2002-08-14, 收到修改稿日期: 2002-11-04

作者简介: 李廷民, 男, 1973 年生, 博士后

在以往的研究中,研究者大都将测量结果作为验证计算结果的工具,并且在计算中采用的基本是绝热边界条件、无限大固体或半无限大固体边界条件,这些假设与实际情况有一定差别,会给计算结果带来一定误差.另外,对于激光涂敷的模拟针对的基本都是单道或单层涂敷过程,对于激光多层涂敷过程的温度场研究则鲜有报道.然而,近年来随着基于激光多层涂敷技术的激光直接成形技术的迅速发展,对深入了解成形过程中材料内部的温度场变化及其对材料性能的影响提出了越来越迫切的要求.因此,本文将从测量和计算相结合的角度对激光多层涂敷的温度场进行了研究,在使用多路热电偶测量了激光多层涂敷过程工件的温度场的基础上,采用有限差分法进行了数值模拟,获得了工件内部的温度场变化规律.为尽量消除各种假设引起的计算误差,使结果更为准确,在计算中采用测量结果作为边界条件,使计算结果与实际情况更为接近.

1 实验方法

实验系统由 RS850 型 5 kW CO₂ 激光器、LPM-408 四坐标数控工作台、JSF-1 自动送粉器组成,其工作原理见图 1. 为保证涂敷每层材料时工艺参数相同,在每涂敷完一层后,送粉器和激光束沿 z 轴上升一个距离 Δz ,再涂敷下一层材料. Δz 的数值与每层厚度大致相当,其大小由送粉量和工件运动速度共同决定. 实验材料为 316L 不锈钢粉末,其成分(质量分数%)为: C 0.03, Cr 16.8, Mo 2.2, Ni 13.8, Si 0.75, Mn 0.3, Fe 余量,基体材料是 316L 不锈钢,尺寸为 120 mm×30 mm×4 mm. 在实验进行之前,所有粉末均进行真空烘干处理,以除去粉末中所吸附的水分,同时基材表面用砂纸将锈打磨掉后再用无水乙醇和丙酮依次清洗干净. 实验参数为:激光功率 3000 W,光斑直径 4 mm,涂敷扫描速度 5 mm/s,光头回程扫描速度 20 mm/s,送粉量 5.1 g/min,保护气体为氩气,流量 10 L/min,单道涂敷 10 层. 采用 NiCr/NiSi 热电偶进行测温,热电偶在基材上的分布情况见图 2. 采用 HSR2300 型多路函数记录仪记录各点的温度变化曲线,记录时间为 20 ms,测温区间为 0—1300 °C,记录间隔为 0.5 s,该仪表的误差为 $\pm 0.05\%$.

2 实验结果与讨论

2.1 温度场测量结果

图 3 是实验测得的各点的温度变化曲线,从中可以看出在每一个涂敷循环中(激光束往复运动一次),各点的温度经历一次从低到高再降低的循环过程. 由于 1, 6 两点位于基材上表面,相对受激光束的影响较强,因而其温度变化相对要剧烈的多,而且其最高温度也比位于下表面的 2, 3, 4, 5 点要高. 在前两层涂敷过程中,各点的最高温度和最低温度均呈上升趋势,表明有大量的激光能量进入基材使之升温,其中 1, 6 两点的最高温度更达到了 1000 °C 以上. 从第 3 层开始,各点在每一次涂敷循环中的温度

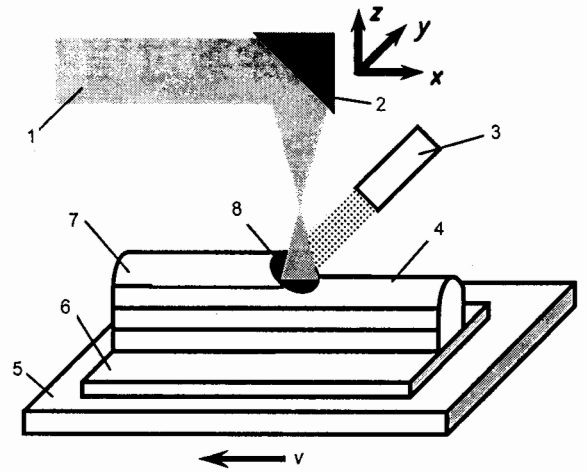


图 1 激光多层涂敷系统示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of the laser direct forming system

- 1—Laser beam, 2—Focus length,
- 3—Powder feeder, 4—Prior passes,
- 5—Working table, 6—Substrate,
- 7—Resolidified metal, 8—Melt pool

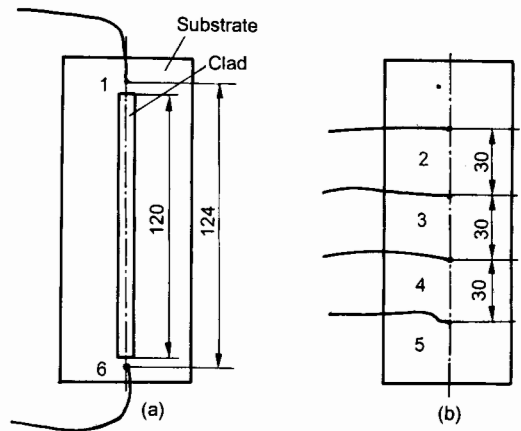


图 2 热电偶分布示意图

Fig.2 Distribution of the six thermal couples on the stainless steel 316L substrate (mm)

- (a) opposite side (b) negative side

最大值逐渐下降,并且出现温度最大值的时间也逐渐后移,而温度最低值仍保持上升趋势,但上升速度逐渐减缓.这是由于随着涂敷层数的增加,热源即激光光斑离基材越来越远,其能量主要通过涂层传递给基材,因而不仅其温度的最大值逐渐下降,而且温度最大值出现的时间也逐渐后移,但由于激光能量仍然不断通过涂层向基材传递,同时实验过程中未采取任何强制冷却措施(如水冷、气冷),基材只能依靠与周围空气的对流和辐射换热来散发热量,因而其温度的最低值呈现缓慢上升的趋势.从第 6 层开始,各点的最低温度基本保持在 300 °C 左右,而最高温度仍然逐渐下降.

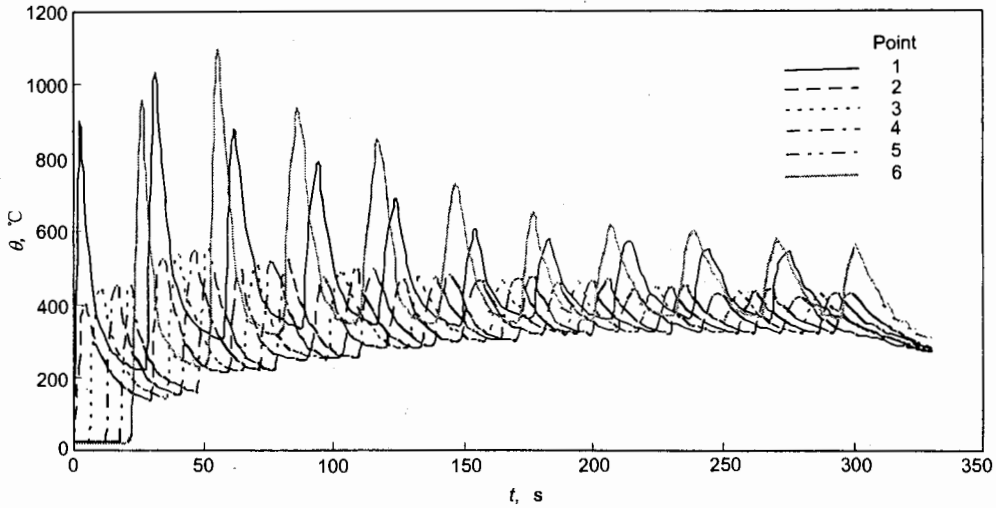


图3 激光多层涂敷温度变化曲线

Fig.3 Measured temperature curves at different positions of the stainless steel 316L substrate during multi-layer laser cladding

2.2 激光多层涂敷温度场数值模拟

考虑到熔池的对称性，本文以涂层纵向中截面为研究对象，并假设以下条件成立：(1) 只考虑温度场单独作用；(2) 设材料的热物性参数为不随温度和时间变化的常数，且固态与液态的热物性参数的差别忽略不计；(3) 忽略熔化潜热的作用，已有一些研究表明，与激光加热的强烈作用相比，即使忽略潜热的作用，计算结果也不会产生显著变化^[7,12]；(4) 粉末预置于基材上；(5) 涂层前端近似处理成一弧形，且光斑的前沿与涂层的最前点重合。根据热传导方程，有

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (1)$$

式(1)中 ρ 为材料的密度， c 为材料的比热容， κ 为材料的导热系数， S 为源项，采用隐式内节点法对方程(1)进行离散化，得到

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (2)$$

其中

$$a_P = a_E + a_W + a_S + a_P^0 + S_P \Delta x \Delta y$$

$$a_E = \frac{\kappa_e \Delta y}{(\delta x)_e} \quad a_W = \frac{k_w \Delta y}{(\delta x)_w}$$

$$a_N = \frac{k_n \Delta y}{(\Delta x)_n} \quad a_S = \frac{k_s \Delta y}{(\Delta x)_s}$$

$$a_P^0 = \frac{(\rho c)_P \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad b = S_C \Delta x \Delta y$$

式中的下标表示该值与各节点有关，其中大写下标代表计算节点周围的各个节点，小写下标代表计算节点与周围节

点之间的边界，具体的节点关系可参考图4。网格划分与坐标系建立参考图5，在计算过程中坐标系按涂敷的层数

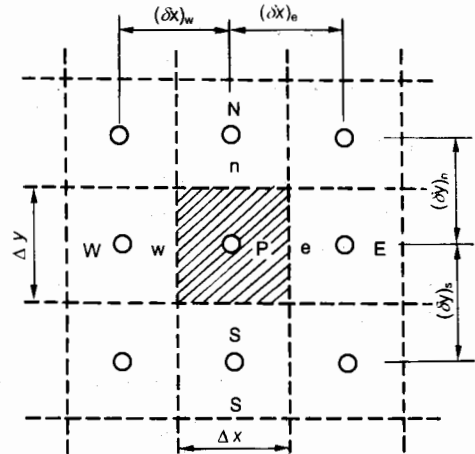


图4 节点位置关系示意图

Fig.4 Schematic diagram of grid in simulation

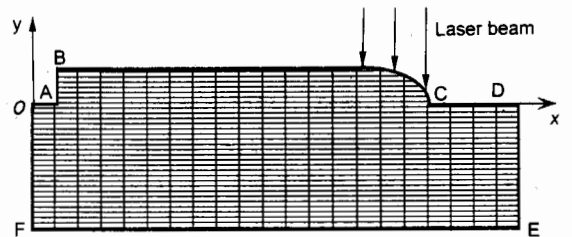


图5 网格划分示意图

Fig.5 Schematic diagram of the mesh

变化,即每计算完一层温度场后, x 轴的位置上抬一层涂层的厚度,这样每层计算时 x 轴都位于新一层的底部. 在建立边界条件时, 本文将前面温度场测量结果通过 3 次多项式插值的方式引入到边界条件中去, 对于涂层表面则采用绝热边界.

计算流程如下: (1) 数据输入: 输入工件的几何参数、激光工艺参数、材料热物性参数、材料初始温度场和温度场测量结果; (2) 按温度场测量结果插值计算边界条件; (3) 按所得边界条件计算温度场; (4) $t_{i+1} = t_i + \Delta t$; (5) 返 (2) 直至时间 t 达到上限; (6) 输出计算结果, 结束计算.

2.3 计算结果及讨论

表 1 和表 2 分别为材料的热物性参数和计算参数.

表 1 材料热物性参数 [12]

Table 1 Thermal parameters of stainless steel 316L [12]

Thermal parameters	Value
Density ρ , g/cm ³	8.03
Specific heat c , J·g ⁻¹ ·K ⁻¹	0.5
Coefficient of heat conductivity K , W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹	0.162
Melting point θ_M , °C	1400

表 2 计算参数

Table 2 Calculation parameters

Calculation parameter	Value
Initial temperature θ_0 , °C	20
Step-size in x direction Δx , mm	0.2
Step-size in y direction Δy , mm	0.005
Time step Δt , s	0.5
Height of single layer h , mm	0.4
Height of substrate H , mm	4

图 6 是多层涂敷件内部温度场数值计算的结果, 其中图 6a 是涂敷第 1 层时试样的温度场, 而图 6b 是涂敷第 10 层时试样的温度场. 从图中可以看出, 在涂敷第 1 层时, 由于基材初始温度较低, 因此等温线较为密集, 基材的熔深约为 0.2 mm 左右, 熔池在 x 方向的尺寸约为 3 mm, 小于光斑直径, 出现这一结果的原因主要是由于光斑尺寸较大, 其边缘部分的功率密度远远小于中心部位, 且不足以熔化基材形成熔池. 而对于涂敷第 10 层的温度场而言, 由于逐层涂敷使得基材内部温度升高, 因此工件内部等温线间距较涂敷第 1 层时明显增大, 而且熔池在 x, y 方向的尺寸均显著增大. 因此, 在激光多层涂敷过程中, 要使各层的涂敷条件完全相同, 就必须逐渐减小激光功率.

图 7 是对应于图 6 的温度场的熔池内部固 - 液界面处的温度梯度计算结果, 从中可以看出, 从熔池底部到顶部, 其温度梯度逐渐减小, 底部最大值可达 13×10^5 K/m, 而到熔池顶部时温度梯度下降近一个数量级. 随着涂敷层

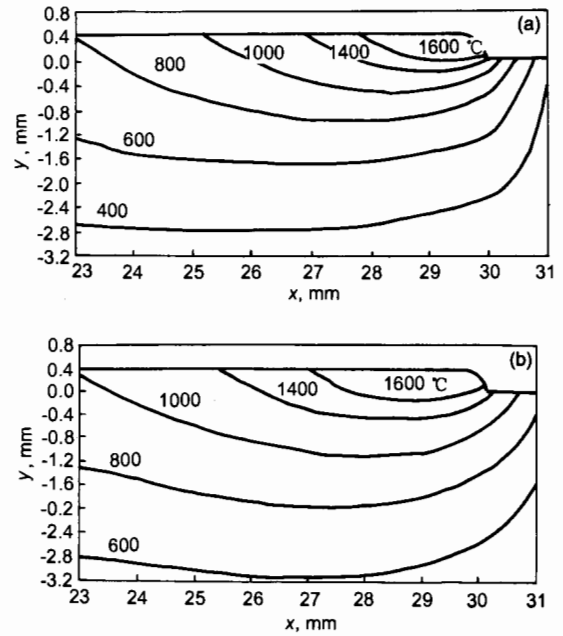


图 6 激光多层涂敷温度场数值模拟结果

Fig.6 The numerical result of the temperature field of multi-layer cladding

- (a) the first layer coated
- (b) the tenth layer coated

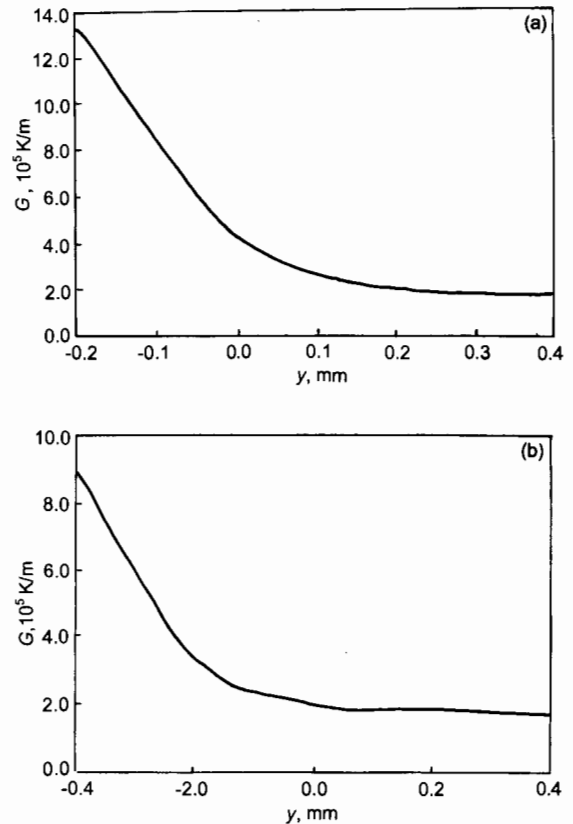


图 7 激光熔池中温度梯度

Fig.7 Temperature gradient in laser melt pool

- (a) the first layer
- (b) the tenth layer

数的增加, 基材的温度逐渐上升, 熔池内部的温度梯度逐渐下降, 第 10 层的熔池最大温度梯度比第 1 层的下降约 1/3. 图 8 是熔池中从底部到顶部温度梯度沿水平方向和垂直方向的分量 G_x, G_y 的变化关系, 从中可以看出, 在熔池底部, 温度梯度垂直方向的分量 G_y 远远大于水平方向的分量 G_x , 而随着距熔池底部距离的增加, G_x 逐渐增大而 G_y 逐渐减小, 到熔池顶部时, G_x 的值大于 G_y 的值.

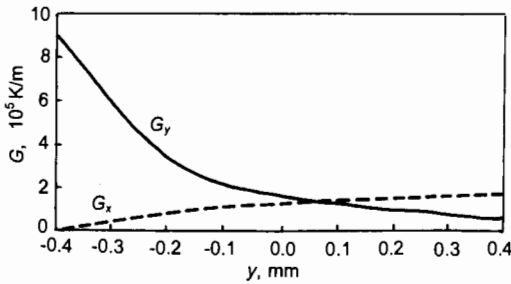


图 8 熔池中温度梯度沿 x, y 方向变化关系图

Fig.8 Evolutions of the temperature gradient G_x and G_y in melting pool

3 结论

(1) 通过多路热电偶测量显示, 在激光多层涂敷过程中, 工件内部的温度呈近似周期性的变化, 在最初的两层时基材内部的温度变化很剧烈, 基材表面靠近熔池的部位温度会高达 1000 °C 以上. 随着涂敷层数的增加, 基材内部各点的最低温度逐渐上升, 最高温度逐渐下降, 而从第 6 层开始, 各点的最低温度基本保持不变, 温度变化趋于平缓.

(2) 数值模拟结果显示从熔池底部到顶部, 其温度梯度逐渐减小, 底部最大值可达 1.3×10^6 K/m, 而到熔池顶部时温度梯度下降近一个数量级, 而且随着涂敷层数的增加, 基材的温度逐渐上升, 熔池内部的温度梯度逐渐下降, 第 10 层的熔池温度梯度比第 1 层的温度梯度下降约 1/3. 同时, 在工艺参数保持不变的情况下, 激光熔池的尺寸随着涂敷层数的增加而增大.

参考文献

- [1] Shamsundar N, Sparrow E M. *J Heat Transfer*, 1975; 8: 333
- [2] Hsu S C, Chakravorty S, Mehrabian R. *Metall Trans*, 1978; 9B: 221
- [3] Hsu S C, Kou K, Mehrabian R. *Metall Trans*, 1980; 11B: 29
- [4] Hsu S C, Kou S, Mehrabian R. *Metall Trans*, 1981; 12B: 33
- [5] Hoadley F A, Rappaz M, Zimmermann M. *Metall Trans*, 1991; 22B: 101
- [6] Anthony T R, Cline H E. *J Appl Phys*, 1977; 48: 3888
- [7] Chan C, Mazumder J, Chen M M. *Metall Trans*, 1984; 15A: 2175
- [8] Kou S, Wang Y H. *Metall Trans*, 1986; 17A: 2265
- [9] Picasso M, Marsden C F, Wagniere J D, Frenk A, Rappaz M. *Metall Mater Trans*, 1994; 25B: 281
- [10] Jehnming L. *Optics Laser Technol*, 1999; 31: 565
- [11] Atwood D C, Griffith M L, Harwell L D, Greene D L, Reckaway D E, Ensz M T, Keicher E M, Schlienger M E, Romero J A, Oliver M S, Jeantette F P, Smugeresky J E. *Sandia Report*, 1999
- [12] Colin J S. *Smithells Metals Reference Book*. 6nd, London: Butterworths, 1983: 14