

复合涂层激光熔池凝固过程的数值模拟*

曾大文 谢长生

(华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074)

摘要: 采用数值模拟技术研究了复合涂层激光熔池凝固过程。结果表明其凝固过程分为凝固准稳态阶段和凝固加速阶段两个阶段。在凝固准稳态阶段, 熔池熔深和半径变化较小, 但表面最高温度、熔池流速急剧减小; 凝固加速阶段则反之。凝固准稳态阶段, 由于上熔池的高度过热, 下熔池产生后熔现象, 形成后熔区。影响后熔的主要因素是熔覆层和过渡区凝固过程中释放的潜热和熔覆层的过热。

关键词: 激光熔池 复合涂层 凝固过程 后熔区

A numerical simulation for solidification process of laser pool for composite coating system

Zeng Dawen, Xie Changsheng

(School of Materials Science and Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: In this paper, solidification process of laser pool for composite coating system is studied, using numerical technology. The results demonstrate that solidification process may be divided into two stages: quasi-state stage and accelerating stage. At quasi-state stage, the depth and radius of laser pool have small changes, but the highest surface temperature and velocity of molten pool decrease rapidly. At the accelerating stage, those are on the contrary. Because of highly overheating in upper molten pool, post molten phenomenon is produced in down molten pool, during solidification quasi-state stage.

* 湖北省自然科学基金、博士点基金和华中科技大学校基金资助。

法提高了近两个数量级。系统对乙烯的最高检测灵敏度可达到 2×10^{-11} 。由于采用了计算机控制和数据处理技术, 使该光谱仪可以每天 24h 连续自动工作, 特别适合于生物组织缓慢生理过程的监测研究。

利用该光谱仪对 O_3 处理后的油桃果实的 C_2H_4 产量变化进行了监测。监测结果表明, O_3 对油桃果实有胁迫作用, O_3 作用后将引起 C_2H_4 产量急剧增加, 使成熟过程加快, 不利于油桃的长期贮藏。实验结果同时显示了高灵敏度的光声光谱检测技术用于生物组织微量气体交换研究的优越性。

参 考 文 献

- 1 Sgrist M W. Air monitoring by spectroscopic techniques. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994
- 2 Harren F, Reuss J. Encyclopedia of Applied Physics. 1997; 19: 413~ 435
- 3 葛自良. 自然杂志, 1999; 21(1): 12~ 14

作者简介: 于清旭, 男, 1955 年出生。博士, 副教授。从事激光光谱学和光电检测技术研究。

The key factors to produce post molten region are the overheating and the latent heat released during solidification process in upper molten pool.

Key words: laser pool composite coating solidification process post molten region

引 言

已有实验研究表明,采用高能激光束在铝合金表面制备高熔点合金层(Ti 基合金或 Fe 基合金),熔池熔体的凝固会诱发铝基材表面发生重熔现象,形成所谓“后熔区”^[1,2]。后熔区组织特征与其它区域不同,表明双层材料的凝固过程有自己的特点,但还未见到有关复合材料激光熔池凝固过程的研究报告。作者采用数值方法模拟复合材料上、下熔池的凝固过程,揭示后熔区的形成过程及影响后熔区形成的因素。

1 物理模型、控制方程及边界条件

复合涂层是指在基材表面(下层材料)制备一层耐腐蚀和耐高温的合金材料(上层材料),形成上下两层热物性不同的组合材料。鉴于复合涂层激光熔池的复杂性,笔者以分离熔池(文献[3]将其分为四类)作为研究对象。复合涂层上、下熔池的形成与凝固过程是随时间演化的过程,这一过程为典型的非稳态过程。为了清晰地模拟出双层材料上、下熔池的形成和凝固过程,在文献[3]所建立的准稳态模型基础上,作如下修正:

(1) 由于激光熔池流速 \vec{V} 比扫描速度($< 10\text{mm/s}$)高 1~2 个数量级^[4,5],扫描速度对激光熔池流动及传热过程影响较小。为了方便计算(不采用自适应网格),假设热源静止;(2) 考虑潜热对流动及传热过程的影响;(3) 激光功率在光斑内均匀分布。

复合涂层激光熔池流动及传热动力学过程由能量方程、动量方程和连续方程控制,其方程的数学表达式如下:

$$\rho c \partial T / \partial t + (\rho c V \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

$$\rho (\partial V / \partial t) + (\rho V \cdot \nabla) V = \nabla \cdot (\mu \nabla V) - \nabla p + \rho g \beta (T - T_0) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (3)$$

式中, $V = [u, v, w]^T$, V 为速度矢量; u, v, w 分别为流体速度 V 在 x, y, z 方向上速度分量; t 为时间; ρ 为密度; k 为热导率; c 为热容; μ 为粘度; p 为压强; T 为温度; T_0 为参考温度; β 为热膨胀系数; g 为重力加速度; 方向为 z 轴正向。

在文献[3]确定的边界条件基础上作如下修正,试样上表面($z = 0$)的热边界条件为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} (1-R)P / (\pi r_0^2) & r \leq r_0 \\ h(T - T_a) + \sigma(T^4 - T_a^4) & r > r_0 \end{cases}$$

式中, h 为换热系数, P 为激光功率, $(1-R)$ 为吸收系数, r_0 为光斑半径, $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 为工件上表面任一点到光源中心的距离, T_a 为环境温度。

由于假设静止光源(相对工件位置都不动),在 x 方向上对流传热关于热源是对称的,则试样左端面的热边界条件($x = 0$)为: $\partial T / \partial x = \partial v / \partial x = \partial w / \partial x = 0, u = 0$

复合涂层不连续界面的确定及控制容积标定方法见参考文献[3]。在非交错网格下采用控制容积法离散控制方程组。动量方程采用 SIMPLE 算法结合动量插值技术求解^[6]。

2 计算结果

数值实验选取的复合涂层为铝钛合金(Al70% + Ti30%),考虑到 Fe 和 Al 基材的高温

热物性参数比较齐全, 计算模型选用铸铁为上层材料, 商业铝为基材, 其热物性参数分别见表 1 和文献 [4]。计算采用的基材尺寸为 $70\text{mm} \times 35\text{mm} \times 10\text{mm}$, 合金层厚度为 2mm , 有效激光功率 $(1-R)P$ 为 1kW , 光斑直径 D 为 4mm , 激光与工件的交互作用时间为 0.8862s 。空间网格数为 $40 \times 20 \times 24$, 时间网格数为 24, 计算时间 24h 。

Table 1 Physical properties of cast iron

name	cast iron	unit	name	cast iron	unit
T_m	1120	$^{\circ}\text{C}$	T_s	1147	$^{\circ}\text{C}$
k_s	46.05	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	k_L	46.05	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
ΔH	2.2×10^5	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	ρ	7800	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\partial \nu / \partial T$	-1.12×10^{-4}	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	C_s	537	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
β	1.3×10^{-4}	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	C_s	870	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
μ	1.0×10^{-3}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	T_p	850	$^{\circ}\text{C}$

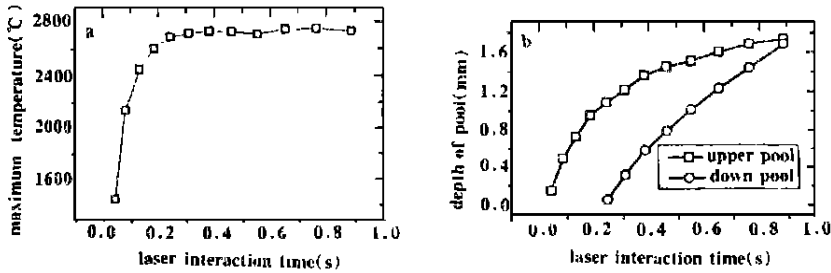


Fig. 1 Effects of laser interaction time on maximum temperature and depth of pool
a—maximum temperature b—depth of pool

激光与材料交互作用前 0.2s 内熔深增加较快, 熔池表面最高温度也急剧增加; 随后熔深增加缓慢, 而熔池表面最高温度几乎保持不变, 熔化过程趋于近平衡。熔化过程初期, 工件在激光束作用下局部受热, 温度迅速升高, 当温度到达上层材料熔点时 (1200°C), 材料开始熔化, 形成上熔池。同时通过对流传热和热传导, 热量迅速向周围扩散, 使熔池周围的材料熔化, 熔池迅速增大。经过一段时间后 (0.2s), 激光束输入上熔池的热量与熔池向外散发的热量几乎相等, 熔化过程达到近平衡, 因此, 熔池形状基本保持不变, 熔池表面最高温度也基本保持不变。对于下熔池而言, 由于激光束不断向上熔池注入热量, 热量通过双层材料结合界面传给基材, 使基材温度升高。随激光交互作用时间的推移, 熔池从无到有, 熔池深度不断增加。

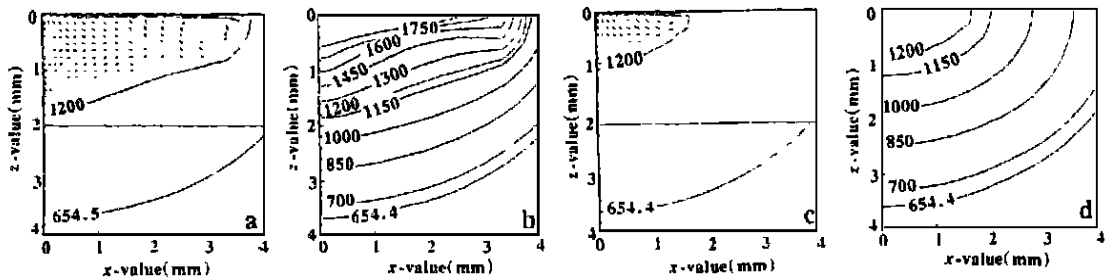


Fig. 2 Profile of velocity and temperature at different time
a—velocity profile b—temperature profile (solidification time 0s)
c—velocity profile d—temperature profile (solidification time 0.2153s)

激光与工件交互作用时间达到 t_{off} (0.8862s) 后, 光源不再向熔池中注入热量, 熔池凝固过程开始。凝固开始时, 上熔池中不仅存在强烈的主旋涡, 而且由主旋涡诱导产生的二次旋涡

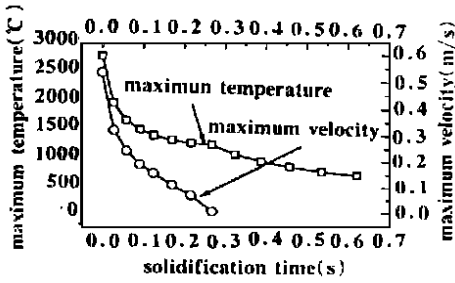


Fig. 3 Effects of solidification time on maximum temperature and velocity

也比较强烈(见图 2a), 强烈的对流导致接近熔池表面和底部的熔合线和某些等温线(1300 °C ~ 1600 °C)向外推移(见图 2b), 表明金属液体对流对上熔池的形状和温度分布有重要影响。随着凝固时间的推移, 对流减弱, 二次旋涡逐渐变小, 直至最后消失(见图 2c)。说明凝固过程流动方式发生改变, 流体运动结构由不稳定趋于稳定, 且等温线较光滑, 热传导又占据主导地位。

图 3 和图 4 表明, 凝固过程分为两个阶段: 凝

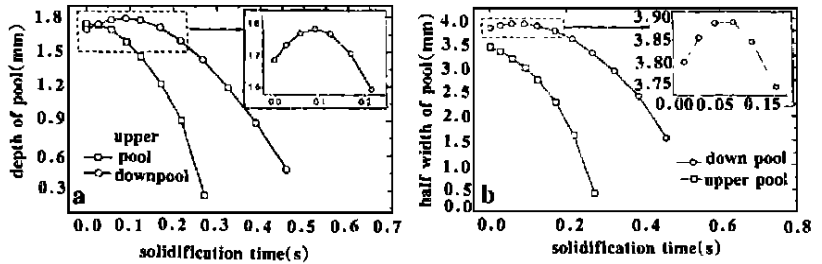


Fig. 4 Effects of solidification time on depth and half width of laser pool
a—depth b—half width

固准稳态阶段和快速凝固阶段。在凝固准稳态阶段, 随凝固时间的推移, 上熔池内流体最大速度和表面最高温度急剧下降, 但熔深和半径缓慢减小; 而下熔池的熔深和半径先缓慢增加(100ms 时间内熔深增加 100 μ m), 到达局部最大后又缓慢下降。后一阶段上熔池内流体最大速度和表面最高温度降低趋于平缓, 上、下熔池的熔深和半径迅速减小, 直至为 0。

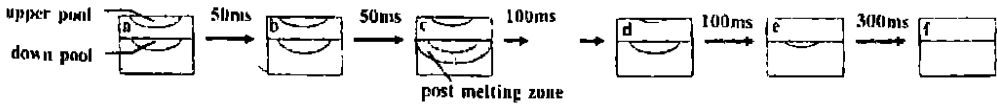


Fig. 5 Schematic of solidification process

a—solidification starting b—the first stage of solidification of upper pool is end c—post molten zone of down pool forming d—the second stage of solidification of down pool is end e—solidification of upper pool is completed f—solidification of down pool is completed

凝固过程开始时, 上熔池最高温度为 2700 °C, 处于高度过热状态。随着凝固时间的推移, 上熔池中的大量热量不断传向基材, 熔池温度急剧下降! 由于上熔池热散发需要一定时间, 同时熔池凝固也要释放一部分潜热, 使熔池温度回升。这段时间内过热和部分熔化热阻止熔池快速凝固, 因此, 上熔池熔深和半径变化较小。但温度梯度的急剧下降, 导致金属液体流速急剧下降, Re 数减小, 熔池底部二次旋涡变小。同时基材不断吸收上熔池释放出来的大量过热和潜热, 产生明显的预热效应, 温度明显提高。这就是上熔池凝固准稳态阶段, 持续时间约 0.05s(见图 5a, 图 5b)。经过凝固准稳态后, 上熔池内的温度趋于均匀, 温度梯度较小, 且接近熔点, 随着热量进一步向外散发, 熔池迅速减小, 并直至完全凝固。这就是熔池凝固加速阶段, 持续时间约 0.25s(见图 5c~ 图 5e)。由于上熔池在凝固过程中释放出来的过热和潜热有一部分传向下熔池, 补偿了下熔池的热量损失, 同时使基材温度升高, 产生明显的加热效应, 导致下熔池向外传热的能力降低, 延缓了下熔池的凝固, 下熔池的凝固准稳态阶段持续时间较

长,为200ms(见图5a~图5d),凝固加速阶段持续400ms(见图5d~图5f),凝固过程与上熔池类似,只不过相对上熔池滞后,这里不再重复。

3 后熔区的形成

Basu等人^[5]对商业铝合金激光重熔凝固过程数值模拟结果表明,即使移走热源,由于熔池处于高度过热状态,导致基材发生少量熔化,熔池稍有增大,这一现象称为“后熔”(post melting)。对于后熔现象存在一个共同的特征,即在没有外加热源向工件注入热量的条件下(移走热源),材料依然发生熔化,这一现象称之为后熔。后熔产生的金属液体区称为后熔区。后熔所需能量是流体过热或凝固过程中释放的潜热,因此,后熔现象发生在液体区域,且一般发生在液体凝固初期。Basu计算清楚地表明,后熔区和激光熔池(热源与材料交互作用所产生的)紧密结合在一起,成为不可分割的一个整体,且影响后熔的主要因素是过热。

虽然下熔池和上熔池的凝固过程大致相同,但从图4不难发现,在凝固准稳态阶段,初期下熔池的熔深和半宽的变化与上熔池明显不同。上熔池的熔深和半宽在缓慢减小,说明上熔池金属液体在凝固;而下熔池却相反,熔深和半径缓慢增加,说明下熔池发生熔化。此时,激光不再向工件注入热量,为典型的后熔现象,形成后熔区,且后熔区与下熔池密不可分。

关闭激光后,上熔池开始凝固(没有观察到Basu所得到的后熔现象)。由于上熔池处于高度过热状态,上熔池凝固准稳态阶段和加速阶段初期向外释放大量过热和潜热,一部分热量传向下熔池,致使下熔池发生进一步少量熔化,熔深和半径都有一定程度增加(见图4),形成后熔区。由于下熔池发生后熔,导致下熔池的寿命比上熔池长。下熔池产生后熔的主要原因是上熔池的过热和凝固潜热。

4 结 论

(1) 双层材料凝固过程分为两个阶段:凝固准稳态阶段和凝固加速阶段。凝固准稳态阶段,熔池熔深和半径变化较小,但表面最高温度、熔池流速急剧减小;凝固加速阶段则反之;(2) 凝固准稳态阶段,下熔池产生后熔现象,导致后熔区的形成;(3) 影响后熔的主要因素是上熔池的高度过热。

参 考 文 献

- 1 Zeng D W, Xie Ch Sh. Laser Technology(激光技术), 2000; 24(6):370
- 2 Wang A H. Investigation into Laser Beam Cladding of Aluminum Alloy and Its Behavior in the Transitional Region. PH D Dissertation, Huazhong University of Science and Technology, 1997: 40
- 3 Zeng D W, Xie Ch Sh, Sheng Y M. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000; 10(4): 502~ 505
- 4 Kou S, Wang Y H. Metall Trans A, 1986; 17A: 2265
- 5 Basu B, Date A W. Int J Heat Mass Transfer, 1988; 31(11): 2331
- 6 Rhie C M, Chow W L. AIAA J, 1983; 21: 1525
- 7 Tao L H. Foundry Handbook. Beijing: Mechanical Industry Press, 1993

* * *

作者简介:曾大文,男,1967年2月出生。讲师。现从事激光材料加工方面的研究工作。

收稿日期:1999-08-30 收到修改稿日期:2000-06-06