

## 复合涂层激光熔池温度场及流场的数值模拟

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:** 建立了复合涂层激光熔池三维准稳态流场及温度场的数值模型,计算出熔池温度分布和速度分布及几何形状。分析了激光功率对熔池温度场、流场及形状的影响。计算结果表明,对于厚度为 0.08mm 的 Ti-Al(30%)复合涂层系统,功率为 750W 时,复合涂层没有熔化,但 Al 基材产生熔化;功率为 1400W 时,在不同材料层内形成上下两个分离的熔池。复合涂层先熔化还是 Al 基材先熔化,依赖复合涂层厚度。激光重熔实验确认了分离熔池的存在,同时计算结果和实验结果基本吻合。

**关键词:** 复合涂层 激光熔池 温度场 速度场

### A numerical simulation for three dimensional quasi-state fluid flow field and temperature field in molten pool for composite coating system

Zeng Dawen, Xie Changsheng

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

**Abstract:** A three dimensional quasi-state numerical model of fluid flow, heat transfer process in the melted pool for composite coating was developed, and the temperature profile, velocity profile in laser pool and pool geometry were successfully calculated. Affects of laser power on heat transfer and fluid flow in a laser pool and the pool geometry were investigated. Numerical results show that there is only one pool in the substrate when laser power is 750W, and there are two separated pools when laser power is 1400W for the composite coating system of Ti-Al(30%) alloy. It is decided by the thickness of the composite coating, whether the composite coating firstly is melt or Al substrate. The experiment of laser remelting was performed for composite coating system, the separated pools have been observed, and the pool geometry was agreement with that calculated.

**Key words:** laser pool composite coating temperature profile velocity profile

## 引 言

采用高能激光制备复合涂层能够改善材料耐磨、耐蚀和耐热性能,因而受到普遍关注,在工业生产中得到了较为广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。为了获得组织和性能优良的表面强化层,对激光熔池动力学过程的研究必不可少。众多学者采用数值的方法对此进行大量深入的研究<sup>[3~6]</sup>,但复合涂层激光熔池流动及传热过程的研究较少。我们旨在研究复合涂层激光熔池传热和流动过程,揭示复合涂层激光熔池的特点。

### 1 物理模型

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。其制备方式包括电镀法、等离子喷涂法和轧制法等。

复合涂层激光重熔的物理过程描述如下:复合涂层试样置于二维可控工作台上,以恒定速度  $u_0$  沿  $x$  方向运动。高功率激光束以恒定功率  $P$  入射到金属表面上,一部分入射光被反射,一部分光被吸收。当被工件吸收的能量超过临界值后,金属熔化产生熔池(如图 1 所示)。由于工件匀速移动,经过一段时间后,达到稳态,熔池形状保持不变,其吸收率 也保持恒定值。

鉴于复合涂层激光熔池的复杂性,我们以分离熔池作为研究对象。为了简化计算,在 S. Kou 模型<sup>[3]</sup>基础上作如下修正:

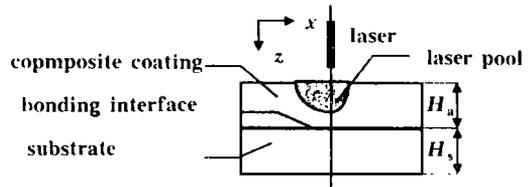


Fig.1 Model of the laser pool for the composite coating system

(1) 计算所需热物参数由材料决定;(2) 仅考虑上层材料激光熔池金属液体流动。如果基体(下层材料)发生熔化,因其熔池表面为约束表面(假设复合涂层不能被熔透),不存在由表面张力梯度引起的 Marangoni 流。熔池内金属液体流动受浮力驱动,而浮力较小,对流较弱,忽略不计;(3) 当上层材料厚度  $H_a$  较薄(  $200\mu\text{m}$ ) 时,复合涂层潜热影响忽略不计。

熔池内金属液体流动受浮力驱动,而浮力较小,对流较弱,忽略不计;(3) 当上层材料厚度  $H_a$  较薄(  $200\mu\text{m}$ ) 时,复合涂层潜热影响忽略不计。

## 2 控制方程及边界条件

复合涂层激光熔池流动及传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:

$$(\rho c \mathbf{V} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{1}$$

$$(\rho \mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{V}) - \nabla p + \rho \mathbf{g} (T - T_0) \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \tag{3}$$

式中,  $\mathbf{V} = [u - u_0, v, w]^T$ ,  $\mathbf{V} = [u, v, w]^T$ ,  $\mathbf{V}$  为速度矢量,  $u, v, w$  分别为流体速度  $\mathbf{V}$  在  $x, y, z$  方向上速度分量。  $\rho$  为密度,  $k$  为热导率,  $c$  为热容,  $\mu$  为粘度,  $p$  为压强,  $T$  为温度,  $T_0$  为参考温度,  $\beta$  为热膨胀系数,  $g$  为重力加速度,方向为  $z$  轴正向。边界条件如下:

$$\text{试样上表面}(z=0)\text{的热边界条件为: } -k \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} P \exp(-r^2/r_0^2)/(r_0^2) & r < r_0 \\ h(T - T_a) + (T^4 - T_a^4) & r > r_0 \end{cases}$$

式中,  $h$  为换热系数,  $q$  为激光功率密度,  $r_0$  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。

试样上表面液体区的流动边界条件为 ( $\partial / \partial T$  为表面张力温度系数):

$$w = 0 \quad \mu \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial}{\partial T} \quad \mu \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial}{\partial T}$$

试样下表面 ( $z = H_s + H_a$ ) 的热边界条件为:  $-k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_a)$

对称面 ( $y = 0$ ) 的边界条件为:  $v = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

试样侧面 ( $y = W/2$ ,  $W$  为试样宽度) 的热边界条件为:  $-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_a)$

试样左端面的热边界条件为:  $\partial T / \partial x = 0 \quad x = -$

试样右端面的热边界条件为:  $T = T_a \quad x = +$

固液界面为无滑移界面,其速度为 0,同时固液界面为等温界面,因此,固液界面的边界条件 ( $T_m$  为熔点) 为:  $T = T_m \quad u = v = w = 0$

### 3 复合涂层不连续界面的确定及控制容积材料的标定

复合涂层系统是由两种热物性质不同材料组合而成,其结合界面热物性质必然不连续。控制容积法最吸引人的特征是在任何一个控制容积内诸如质量、能量和动量等物理量的积分守恒可以精确地得到满足。但控制容积法要求控制容积内的物理量不存在不连续性。对于复合涂层系统,要求组合材料不连续界面必须位于控制容积界面上。

设复合涂层厚度与基材厚度之比为  $s(s > 1)$ ,复合涂层沿  $z$  方向采用均匀网格划分,基材采用不均匀网格,压缩比为  $r$ , $z$  方向上网格总数为  $ZN$ (不包括端点),则复合涂层所占网格数  $n$  满足如下方程:

$$n = s(1 - r^{ZN - n + 1}) / [(1 - r)(1 - s)] \quad (4)$$

采用牛顿迭代法求解方程(4)。求解出来的网格数  $n$  不一定是整数,采用四舍五入的方法对  $n$  取整,但取整后复合涂层的计算厚度显然不是实际材料厚度。因此,引进数学中极值的概念,通过压缩比  $r$  的变化( $r \in [0.8, 0.9]$ ),求解得到不同的复合涂层所占网格数  $n$  和计算厚度与实际复合涂层厚度之差  $e$ ,取满足差值最小的压缩比  $r$  为计算所需压缩比,其对应的网格数  $n$  为复合涂层所占网格数。即求解满足泛函  $J(n, r)$ (计算厚度与实际材料厚度之差  $e(f(r), r)$ ) 为最小的压缩比  $r$ ,其具体数学操作如下:

$$J(n, r) = e(n, r) = e(f(r), r) \Rightarrow \min_{r \in [0.8, 0.9]}$$

由于材料决定热物参数,必须对控制容积的材料进行标定。确定了复合涂层不连续界面位置,使得标定控制容积材料成为可能。其具体的标定操作如下:

- 控制容积  $V[i, j, k]$  为合金层,热物参数随温度的变化关系由合金层性质确定  $k \leq n$
- 控制容积  $V[i, j, k]$  为基材,热物参数随温度的变化关系由基材性质确定  $k > n$

式中, $k$  为  $z$  方向上任意网格节点的序号。

如图 2 所示,复合涂层存在一个材料不连续的界面  $t$ ,节点 P(网格序号为  $n$ )的导热系数  $k_P$  由合金性质决定,节点 T 的导热系数  $k_T$  由基材性质决定。界面  $t$  的导热系数  $k_t$  采用调和平均计算:

$$1/k_t = (1 - f) / k_P + f / k_T \quad (5)$$

式中, $f = (\delta z)_{t+} / (\delta z)_t$ 。

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<sup>[7,8]</sup>。离散得到的代数方程组采用 ADI 线性迭代法求解。熔池温度场与速度场满足下列条件,认为迭代收敛:

$$\frac{|u_i^{n+1} - u_i^n|}{|u_i^n|} < 10^{-3} \quad \text{Max}_i (|T_i^{n+1} - T_i^n| / |T_i^n|) < 10^{-3}$$

### 4 计算结果

数值实验选取的复合涂层为铝钛合金 (Al 70% + Ti 30%),厚度为  $80\mu\text{m}$ (小于  $200\mu\text{m}$ ,不考虑潜热影响),基材为硬铝,试样尺寸为  $80\text{mm} \times 60\text{mm} \times 15\text{mm}$ 。由于缺乏铝钛粉的热物性参数,采用硬铝和纯钛的热物性参数<sup>[9]</sup>算术平均值,计算得到的铝钛粉热物性参数见表 1。其中铝钛粉的熔点由 Al-Ti 二元平衡相图确定,为  $1320^\circ\text{C}$ ,硬铝的热物参数见文献[3]。激光重熔的工艺条件分别为:吸收率为 0.55,光斑直径  $D$  为  $0.8\text{mm}$ ,光源模式为 Gaussian 模式,扫描

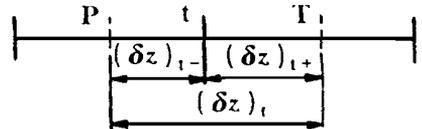


Fig. 2 Bonding interface of composite coating system

速度  $u_0$  为 250mm/s, 计算网格数  $60 \times 42 \times 32$ 。

Table 1 Thermo-physical properties of Al-Ti (30%) alloy

$T_m$ (°C)	$\rho$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\partial / \partial T$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\mu$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\gamma$ (J/m)	$k$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\rho$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c$ ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )
1320	$3.5 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-5}$	160.6	3241.4	785.4	

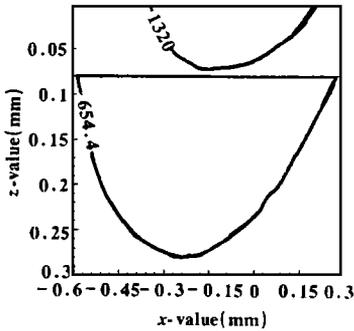


Fig. 3 Shape of separated pool (front view)

图 3 为计算得到的熔池形貌。计算结果显示存在分离熔池, 上熔池的熔深为  $72\mu\text{m}$ , 下熔池的熔深为  $278\mu\text{m}$ 。上熔池和下熔池相对光源滞后, 且下熔池滞后更强烈, 其主要原因是上熔池的滞后导致热量向下熔池传导具有明显的方向性。图 4 为复合涂层激光上熔池的温度分布和速度分布, 计算结果显示激光熔池明显滞后 (如图 4a 所示), 熔池右旋涡液体旋转比左旋涡更强烈, 不存在由主旋涡诱导产生的二次旋涡 (见图 4b)。高扫描速度  $u_0$  引起熔池温度分布发生变化, 熔池中心 (自由表面最高温度所处位置) 与光源中心分离, 导致熔池相对光源滞后, 熔池左右旋涡不对

称。图 5 为通过计算得到的不同复合涂层厚度下激光功率对上下熔池熔深的影响。随着激光功率的增加, 上下熔池从无到有, 熔深也随之增加。图中还可以清楚地看出, 提高激光功率, 熔池经历了如下变化: 无熔池 → 单一熔池 → 分离熔池 → 混合熔池 (见表 2)。当激光功率较小

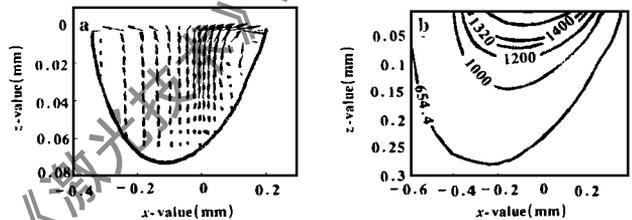


Fig. 4 Velocity and temperature profile of upper pool  
a - velocity profile b - temperature profile

时, 被材料吸收的能量不足以使材料熔化, 此时无熔池产生。提高激光功率, 某一层材料被熔化, 同时另一种材料没有被熔化, 形成单一熔池。进一步提高激光功率, 上下材料都发生熔化, 但复合涂层没有被熔透, 形成上下分离熔池。当激光功率提高到某一阈值时, 复合涂层被熔透, 上下熔池贯通, 形成混合熔池, 即合金化熔池。同

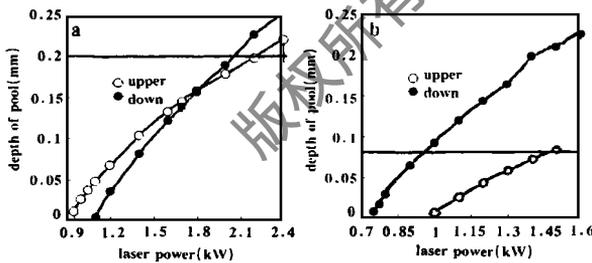


Fig. 5 Effects of laser power on depth of pool  
a -  $H_c = 200\mu\text{m}$  b -  $H_c = 80\mu\text{m}$

时复合涂层厚度对复合涂层的熔化次序有重要影响 (见表 2)。复合涂层厚度为  $80\mu\text{m}$  时, 下层材料先于上层材料熔化。复合涂层厚度为  $200\mu\text{m}$  时, 则反之。

Table 2 Effects of laser power on the characteristics of laser pool

$H_c$ ( $\mu\text{m}$ )	no pool	unique pool	separated pool	mixed pool
80	$P < 750$	$P < 1000$	$P < 1450$	$P > 1450$
200	$P < 900$	$P < 1100$	$P < 2200$	$P > 2200$

### 5 实验结果及比较

复合涂层激光重熔实验用基体材料为硬铝, 试样尺寸为  $80\text{mm} \times 60\text{mm} \times 15\text{mm}$ , 先用超声



Fig. 6 Micrograph of laser pool

池被未熔合金分离,形成上、下分离熔池,与计算结果相吻合。图7为实验测得的上、下熔池形貌。实测结果与计算结果基本吻合。其中下熔池与计算结果符合得比较好,上熔池计算结果与实验存在一定的差距。其原因是缺乏Al-Ti 30%-Ni 20%合金的热物参数。同时,高能量密度( $2.78 \times 10^9 \text{ Wm}^{-2}$ )作用在复合涂层表面可能产生等离子体,导致能量注入方式发生变化,模型没有加以考虑,因此,模型有待进一步完善。

## 6 结 论

我们建立了复合涂层三维准稳态激光熔池流场及温度场的数值模型,计算出熔池温度分布和速度分布及熔池几何形状。得出结论:(1)计算结果表明激光功率熔池特征有重要影响。提高激光功率,熔池经历了如下变化:无熔池 单一熔池 分离熔池 混合熔池。(2)复合涂层和Al基材熔化次序,依赖复合涂层厚度。(3)实验观察到激光分离熔池,且实验结果和计算结果基本吻合。

### 参 考 文 献

- 1 Wang A H, Tao Z Y, Zhu B D *et al.* *Welding J*, 1991; 70(4): 106
- 2 Volz R. *ICAL EO*, 1993; 56(3): 999
- 3 Kou S, Wang Y H. *Metallurgical Transactions*, 1986; 17A: 2265
- 4 Zacharia T. *Metallurgical Transactions*, 1991; 22B(4): 233
- 5 Picasso M, Hoadley A F A. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 1994; 4: 61
- 6 Basu B, Date A W. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 1988; 31(11): 2331
- 7 Rhie C M, Chow W L. *AIAA J*, 1983; 21: 1525
- 8 Melaaen M C. *Numerical Heat Transfer: B*, 1992; 21: 21
- 9 Allen B C. *Liquid Metal-Chemistry and Physics*. New York: M Dekker Inc, 1972

作者简介:曾大文,男,1967年2月出生。讲师。从事激光材料加工研究工作。

收稿日期:1999-05-21 收到修改稿日期:1999-07-12

波清理基材表面,然后用丙酮清洗干净待用。采用等离子喷涂法在清理干净的基材表面喷涂一层厚度为  $100\mu\text{m}$  的 Al 50%-Ti 30%-Ni 20% 合金涂层。采用功率为 2kW 的  $\text{CO}_2$  激光器进行重熔处理,实验用工艺参数为:功率  $P$  为 1.4kW,光斑直径  $D$  为 0.8mm,光源模式为 Gaussian 模式,扫描速度  $u_0$  为 250mm/s。为了使合金层与基材结合致密,进行了低速(60mm/s)激光重熔预处理,搭接率为 45%。沿横向(垂直扫描速度方向)切取金相试样,经打磨、抛光处理,采用王水腐蚀。用 XJC-02 光学显微镜和 JSM-35C 型扫描电镜观察熔池形貌。图6为双层材料激光重熔熔池形貌。图中可以清楚地看到白色合金层存在一熔池,同时基体内也存在一熔池,两熔

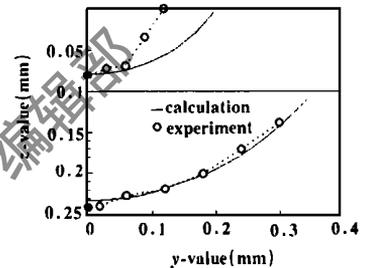


Fig. 7 Comparison between calculated and experimented results