

# 基于温度场模拟的激光熔覆生物陶瓷涂层 工艺参数选择

鲍雨梅 高海明 张冬明 许景顺 马龙

浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014

**摘要** 根据激光熔覆生物陶瓷涂层的特点,选择二维带状热源模型,研究计算了材料物理性能在不同温度下的变化曲线,并建立温度场模型。将实验制备的涂层从涂层外观、显微硬度、涂层与基体的结合强度、涂层物相等方面对比模拟结果与实验结果,从而论证模型的可靠性。根据模拟结果可得:激光功率与扫描速度均会影响熔池深度,且激光功率的影响大于扫描速度;根据模拟的变化趋势分析,选择的激光熔覆的工艺参数为功率 $P=1700\text{ W}$ ,扫描速度 $V=165\text{ mm/min}$ 。模拟预测了不同涂层厚度、工艺参数条件下的熔池深度。

**关键词** 材料;生物陶瓷;工艺参数;温度场模拟;激光熔覆

中图分类号 TN249;TB39 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.111601

## Laser Cladding Bio-Ceramic Coating Process Parameters Selection Based on Simulation of Temperature Field

Bao Yumei Gao Haiming Zhang Dongming Xu Jingshun Ma Long

Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education/  
Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

**Abstract** Based on the characteristics of laser cladding bio-ceramic coatings, the two-dimensional ribbon heat source is chosen to study and calculate the physical properties of material's change curves under different temperatures, and the temperature field model is established. The experimental and the simulated results of the prepared coatings are compared in terms of preparation of coatings results in simulative and coating appearance, micro-hardness, bonding strength with substrate and coating phase, which demonstrates the reliability of the model. According to the simulation results, the following conclusion is drawn: both of laser power and scanning speed will affect the depth of molten pool, but the influence of laser power is greater than that of scanning speed. Based on the change trend analysis of simulation, the laser cladding process parameters are  $P=1700\text{ W}$ ,  $V=165\text{ mm/min}$ . The depth of molten pool under different coating thicknesses and process parameters is simulated and forecasted.

**Key words** materials; bio-ceramic; process parameters; simulation of temperature field; laser cladding

**OCIS codes** 160.1435; 160.3380; 140.3390

## 1 引言

激光熔覆作为一种表面改性技术,利用较高功率密度( $10^4\sim 10^6\text{ W/cm}^2$ )的激光束加热基体,同时熔入其他材料,随后快速冷却凝固。与等离子喷涂等相似工艺比较,激光熔覆能够实现良好的冶金结合,稀释率低,输入基体的能量和基体的热变形小,加热和冷却速度较高<sup>[1]</sup>。因此,激光熔覆技术用于制备生物陶瓷涂层成为了一个热门的研究。在钛合金(TC4)上制备羟基磷灰石(HA)涂层,由于涂层与基体的热膨胀系数差异较大,容易导致涂层的开裂,故引入梯度涂层设计概念,用激光熔覆先后制备过渡层、陶瓷层,其中过渡层中加

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-06-09; 网络出版日期: 2014-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(50975259, 51275471, 50375145, 51105339)

作者简介: 鲍雨梅(1971—),女,博士,教授,主要从事材料断裂、损伤等失效分析等方面的研究。

E-mail: baoym@zjut.edu.cn

入50%(质量分数)钛粉。但是,激光束温度太低,不能完全熔化钛粉与基体,导致涂层与基体之间不能形成冶金结合。温度太高容易导致陶瓷的烧蚀,并且影响涂层的质量,使得涂层中HA含量下降。因此,工艺参数的选择对涂层的制备显得非常重要。

现阶段优化激光熔覆的工艺参数通常以大量的工艺实验数据为基础,工作量大,成本高,并且对涂层的质量没有预测性。目前国内外众多学者用数学方法对工艺参数与涂层质量之间的关系进行了研究。王东生等<sup>[2]</sup>利用神经网络与遗传算法相结合的方法对陶瓷涂层工艺参数进行了优化,建立了工艺参数与涂层质量(结合强度与显微硬度)之间的预测模型。倪立斌等<sup>[3]</sup>研究了神经网络与粒子群算法相结合的方法优化工艺参数,建立起了熔覆带高度、宽度与工艺参数之间的预测模型。用数学方法可以拟合出工艺参数与涂层熔覆层高度、熔深等几何形貌之间的关系,但是参数缺乏明显的物理含义,在不同的条件下拟合出的表达式不同<sup>[4]</sup>,大大限制了这种实验拟合方法的实际应用。邓迟等<sup>[5]</sup>对激光熔覆生物陶瓷涂层进行了温度场的模拟,并根据涂层的扫描电子显微镜(SEM)组织分析和硬度测定对模拟的结果进行了可靠性论证。刘昊等<sup>[6]</sup>研究了基于生死单元法建立的可同时计算瞬态温度场及熔覆层几何形貌的三维数值模型,最后通过熔覆层表面轮廓线、熔覆层横截面宽度、高度等表面形貌说明其模型的有效性和可靠性。石世宏等<sup>[7]</sup>对内送粉激光熔覆温度场进行了数值模拟,并通过熔道形貌以及冶金结合处的对比来分析说明模型的可行性。

上述方法中存在一些不足之处,对温度场模型的可靠性说明不够全面,仅从熔池高度、宽度等涂层形貌上来说明存在一定的片面性。对模型的论证只是论证了某一种状态下可行,并没有对其趋势进行预测与验证,大大限制了温度场模型在实际情况中的应用。本文借助ANSYS商业软件建立有限元模型,从多方面验证模型的可靠性,并且能够指导对工艺参数的优化,同时预测不同工艺条件下的涂层质量。

## 2 模型建立与实验过程

### 2.1 模型的假设

为了简化计算过程,取模型的一半进行计算,并做如下假设:

- 1) 粉末层全部融化之前,粉末层向基体的导热忽略不计;
- 2) 不考虑材料在高温时的气化作用;
- 3) 经典的传热理论适用于激光对材料的相互作用;
- 4) 不考虑熔池中液体内部流动产生的对流换热影响;
- 5) 忽略在高温下的化学反应作用对温度场的影响;
- 6) 各层材料内各向同性。

### 2.2 模型的建立

#### 2.2.1 材料物理性能参数

激光熔覆生物陶瓷涂层属于瞬态传热问题,材料物理性能是数值模拟的前提,不同的温度下,材料的比热容、热传导率、对流换热系数和焓等不同,实验中涉及的基体材料是TC4,其低温条件下比热和导热系数如表1所示,高温参数采用外推法估算<sup>[8]</sup>。

表1 TC4热物理参数

Table 1 Thermal physical parameters of TC4

Temperature/°C	20	100	200	300	400	500	600
Thermal conductivity / [W/(m·°C)]	5.4	6.7	8.8	10.5	12.6	14.2	15.9
Density/(kg/m <sup>3</sup> )	4450	4450	4450	4450	4450	4450	4450
Specific heat capacity/[J/(kg·°C)]	/	678	691	703	741	754	879

预置层粉末材料主要是CaCO<sub>3</sub>粉末、CaHPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O粉末、钛粉。随着温度的变化,预置粉末会发生化学反应,不同的温度条件下产物不同。由于产物不止一种,所以总的物理性能按各自的体积权重进行估算,估算公式为<sup>[9]</sup>

$$\lambda = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \lambda_i, \quad (1)$$

$$c = \sum_1^n f_i \cdot c_i, \quad (2)$$

$$\rho = \sum_1^n g_i \cdot \rho_i, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为材料导热系数,  $\rho$  为材料的密度,  $c$  为材料的比热容,  $g_i$  为粉末材料的体积分数,  $f_i$  为粉末的质量分数。

由于涂层中存在气孔,故熔覆涂层的导热系数估算引入传导系数麦氏方程:

$$\lambda_p / \lambda_m = (1 - \alpha) / (1 + \alpha), \quad (4)$$

式中  $\lambda_p$  为涂层粉末的导热系数,  $\lambda_m$  为纯物质的导热系数,  $\alpha$  为气孔占总体积的比例,本模型中取值为 12.5%。求得的涂层综合物理性能参数如图 1 所示<sup>[10]</sup>。

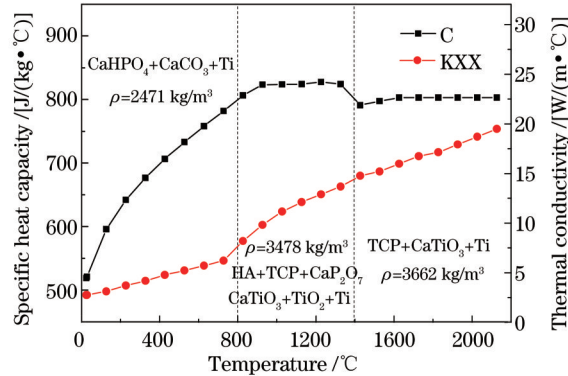


图 1 预置层粉末材料物理性能参数

Fig.1 Physical property parameters of the preset powder layer

对上述曲线用 Matlab 软件拟合可得

$$C = \begin{cases} -0.0002t^2 + 0.5024t + 540.833, & 0 \leq t \leq 700 \\ -0.0003t^2 + 0.5551t + 519.357, & 700 < t \leq 1300 \\ 793, & 1300 < t \leq 2100 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\lambda_p = \begin{cases} 0.0804t + 492.5, & 0 \leq t \leq 700 \\ -0.0002t^2 + 0.522t + 268.2143, & 700 < t \leq 1300, \\ 0.1213t + 507.1778, & 1300 < t \leq 2100 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $t$  为温度,单位为  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2.2 相变潜热

在激光熔覆过程中存在两类相变,一类是固态相变,即基体材料金相组织的转变;另一类是固液相变,涂层材料固态-液态-固态的相变,会产生相变潜热。由于前者的相变影响较小,所以本模型只考虑固液相变。其数学定义为<sup>[11]</sup>

$$\Delta H = \int_{T_0}^T \rho C(T) dT, \quad (7)$$

式中  $\rho$  为材料密度,  $\Delta H$  为热焓的变化,  $C(T)$  为材料随温度变化的比热容。

### 2.2.3 热源模型

实验设备的激光光斑大小为  $12 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 并且热量均匀分布,所以选择二维带状热源模型,其能量密度分布为<sup>[10]</sup>

$$I = a \cdot P/A, \quad (8)$$

式中  $I$  为能量密度,  $a$  为工件对激光的吸收率,  $P$  为激光输出功率,  $A$  为光斑面积大小。实验模拟过程中,工件表面未达到材料熔点前吸收率  $a$  取 0.25, 溶化后吸收率  $a=0.5$ <sup>[12]</sup>。

### 2.2.4 动态接触热阻

接触热阻的大小与接触表面的粗糙度、接触面材料与间隙物质的导热性能有关。在忽略对流与辐射换热的情况下可近似表达为<sup>[9]</sup>

$$R_i = \frac{2h_y}{k_1\lambda_1 + k_2\lambda_2 + k_3\lambda_3}, \quad (9)$$

式中  $R_i$  为接触热阻( $\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$ ),  $h_y$  为表面轮廓的最大高度(m),  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  分别为预置涂层、基体材料和空气的热导系数。取空气热导率  $\lambda_3 = 0.03$ , 当涂层与基体冶金结合时,  $\lambda_3 = 0$ 。反映接触材料表面粗糙度情况的  $k_1$ 、 $k_2$  以及  $k_3$  分别为 0.289、0.113、0.696<sup>[13]</sup>。

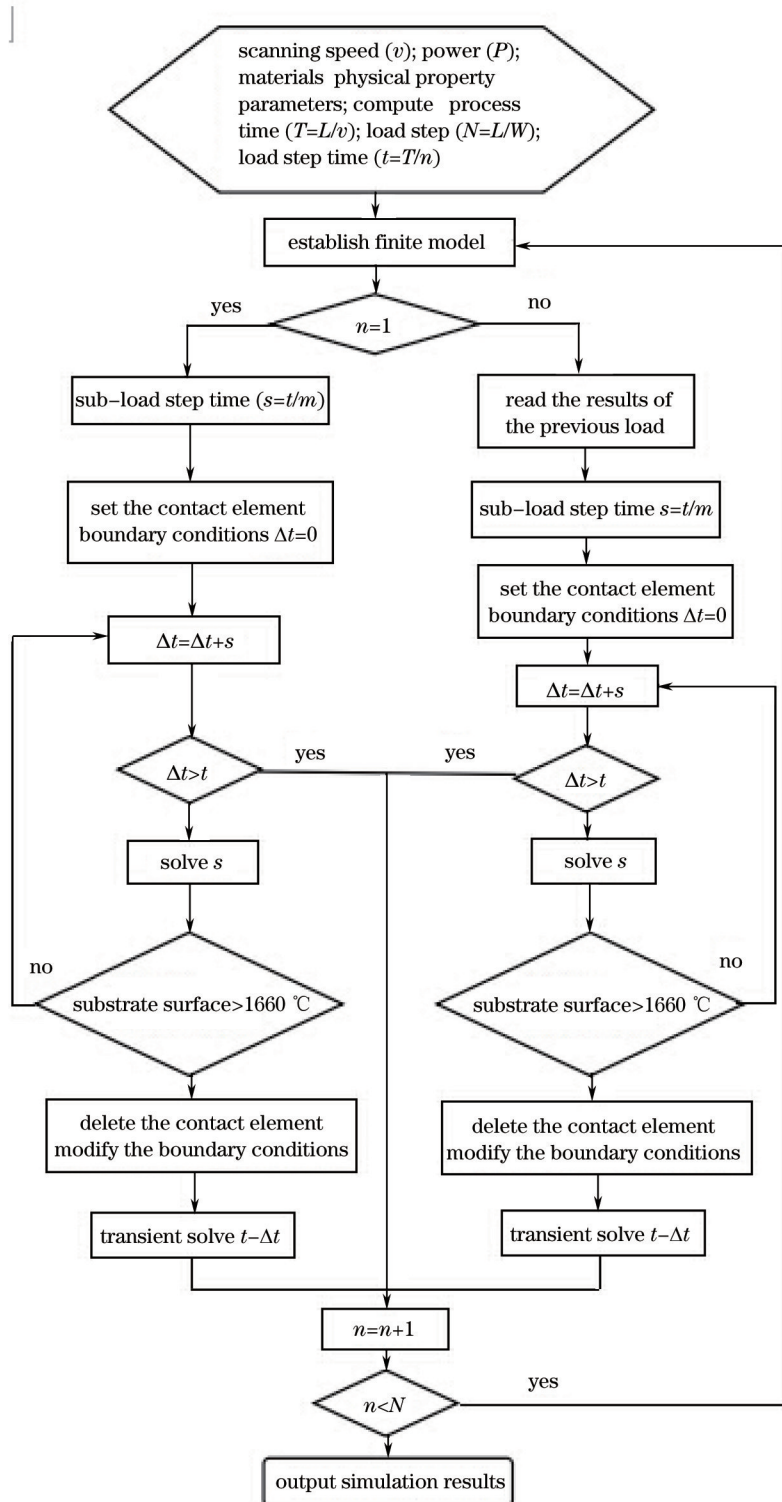


图2 温度场模拟过程流程图

Fig.2 Flow chart of temperature field simulation

### 2.2.5 边界条件

经典的热传导模型中,考虑两类边界条件:

1) 边界上热流密度分布,即

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y = q_s(x, y, t'); \quad (10)$$

2) 边界与外界环境进行热交换,即

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y = \beta(T_s - T_0), \quad (11)$$

式中  $\lambda$  为热导率,  $q_s$  为单位面积上外部输入的热源,  $\beta$  为表面对流换系数,  $t'$  为激光扫描时间,  $T$  为温度场分布函数,  $T_0$  为外界环境温度,  $T_s$  为已知边界温度,  $n_x, n_y$  为边界外法线的方向余弦。

在激光熔覆过程中基体热辐射会引起能量的损耗,但为了简化建模与计算,将这部分损耗在对流换热中予以考虑。为避免热流密度和热对流边界条件施加于同一表面引起的矛盾并灵活地控制对流载荷,将热载荷施加于基体表面上,对流系数施加于表面效应单元 Surface152 上。

### 2.3 模拟的流程

以预置粉末的方式激光熔覆生物陶瓷涂层,首先激光加热涂层粉末,由于涂层粉末的导热率较低且作用时间较短,因此忽略此部分的热传导。等到粉末熔化后,激光通过熔化液体向基体加热,实现涂层与基体的冶金结合。温度场模型中设置了接触单元,在预置粉末完全熔化之前,由于接触热阻的设置,预置粉末涂层未向基体传递热量。一旦涂层温度达到熔点就删除接触单元,实现涂层与基体的结合。激光熔覆温度场模拟过程如图 2 所示。

## 3 温度场模拟结果验证

为了验证模拟结果的可靠性,在 TC4 基体上以预置粉末的方式用激光熔覆生物陶瓷涂层。预置层中加入  $\text{CaCO}_3$  粉末和  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  粉末,按照钙磷比(物质的量)2.0 配比,并加入 50%(质量分数)钛粉。混合均匀以后用 5% 聚乙烯醇作为粘结剂预置于 TC4 表面。选用最大功率为 5 kW 的横流  $\text{CO}_2$  激光器进行熔覆,其熔覆过程如图 3 所示,制备时所选用的工艺参数如表 2 所示。

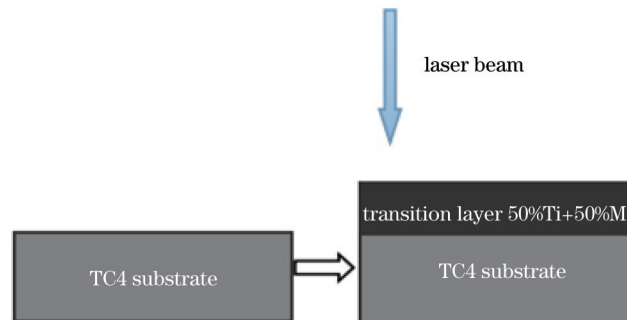


图 3 预置粉末激光熔覆过程示意图

Fig.3 Schematic of laser cladding with preplacing powder

表 2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Process parameters of laser cladding

Sample	Power /W	Scanning speed /(mm/min)	Preset layer thickness /mm
1	1800	165	0.3
2	2000	165	0.3
3	2000	150	0.5

由于熔覆过程中对温度的直接测量比较困难,所以从涂层截面形貌与模拟温度场云图、截面硬度、涂层与基体的结合强度、涂层物相分析等全方位验证结果的可靠性。

### 3.1 涂层截面形貌与模拟温度场云图

在不同的工艺条件下制备出的涂层截面与模拟出的温度场云图分别取左右各一半,并放在一起进行对比。试样序号 1、2、3 对应的对比如图 4~6 所示。



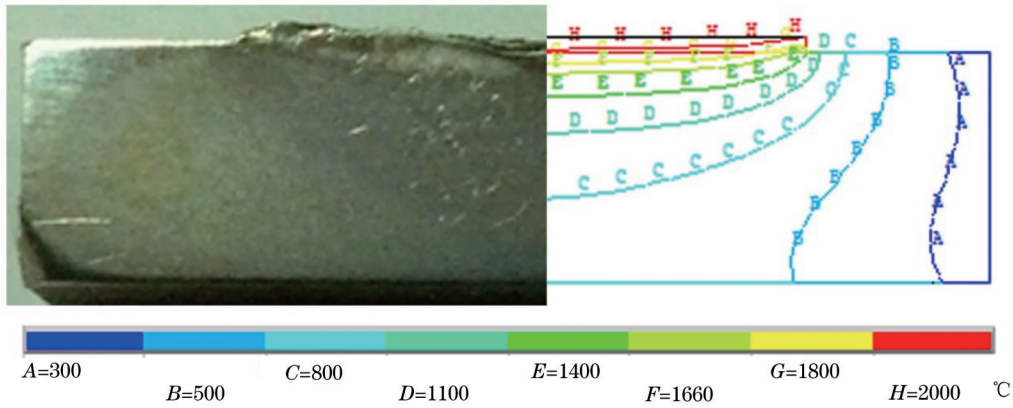


图4 试样1激光熔覆过渡层模拟结果对比

Fig.4 Comparison of sample 1 laser cladding transition layer with the simulation results

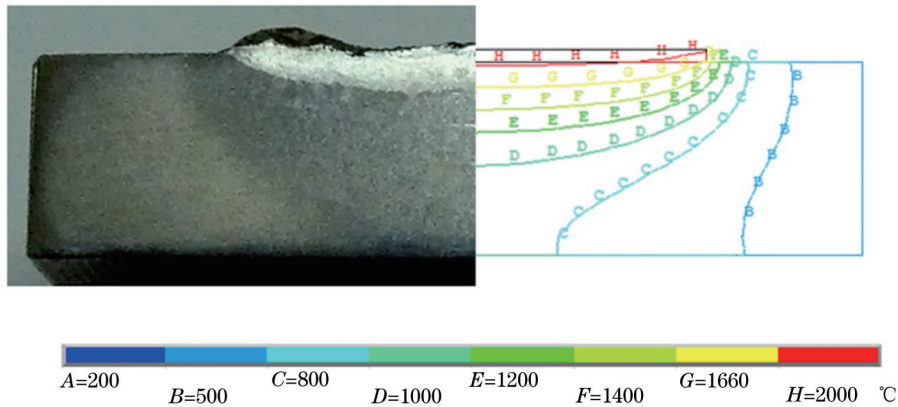


图5 试样2激光熔覆过渡层模拟结果对比

Fig.5 Comparison of sample 2 laser cladding transition layer with the simulation results

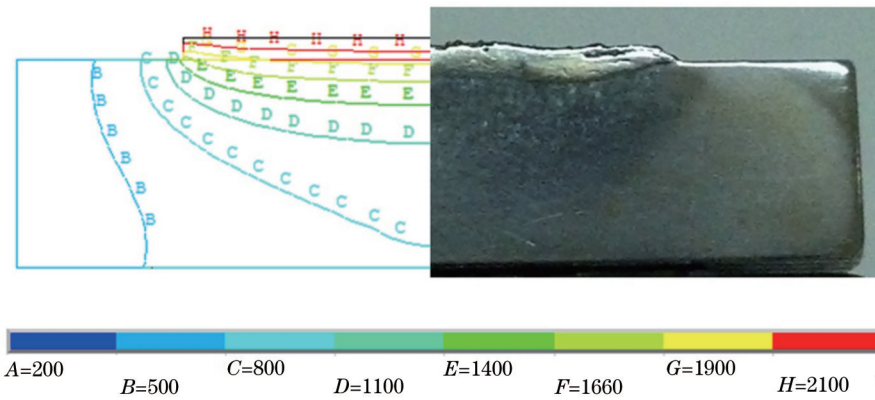


图6 试样3激光熔覆过渡层模拟结果对比

Fig.6 Comparison of sample 3 laser cladding transition layer with the simulation results

对熔池的深度与宽度进行测量,平均每组测量5次,取中间的3次的平均值作为实测值,测量结果与模拟计算结果如表3所示。

表3 基体实际熔池深度和宽度与模拟结果对比

Table 3 Contrast of substrate pool depth and width in the experiment and the simulated results

Content contrast	Sample 1		Sample 2		Sample 3	
	Measured value	Calculated value	Measured value	Calculated value	Measured value	Calculated value
Depth/mm	0.660	0.677	0.817	0.832	0.447	0.489
Width/mm	11.5	11.4	12.0	11.9	11.4	11.6

由表3可知,不同工艺参数和不同预置层厚度下基体熔池尺寸的计算值和实测值较为吻合;同时,熔覆试样横截面与模拟结果云图对比显示,基体熔池深度、形貌以及热影响区形貌符合模拟结果温度等值线分布。

### 3.2 涂层截面硬度

基体与涂层的截面如图7所示;分别在截面上选取5个点( $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$ ),对这5个点分别测量显微硬度值。试样1所测量的显微硬度如图8所示,三组实验5点的显微硬度如表4所示。

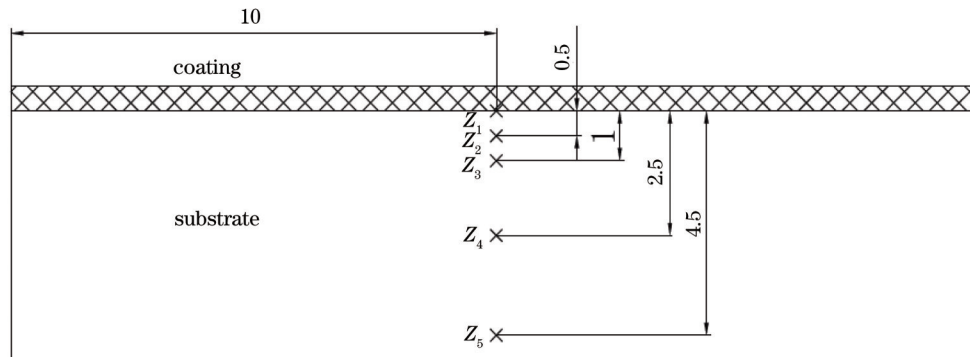


图7 基体与涂层截面图

Fig.7 Section diagram of substrate and coating

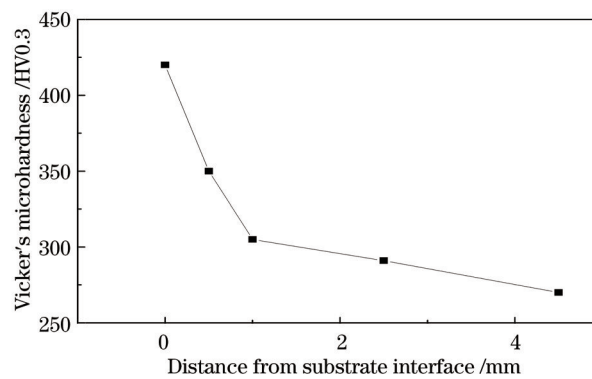


图8 激光熔覆涂层截面显微硬度分布图

Fig.8 Microhardness distribution of the laser cladding coating section

表4 基体截面硬度

Table 4 Microhardness of substrate section

Sample	$Z_1$ Hardness / HV0.3	$Z_2$ Hardness / HV0.3	$Z_3$ Hardness / HV0.3	$Z_4$ Hardness / HV0.3	$Z_5$ Hardness / HV0.3
1	520	391	305	282	277
2	537	433	312	301	280
3	558	443	316	289	285

在 $Z_1$ 点,基体与涂层的交界处显微硬度超过了500 HV0.3,这是熔融状态下陶瓷相的渗透以及晶粒细化共同作用的结果。随着与基体表面的距离增大,温度降低,陶瓷相的渗透作用变小,晶粒细化作用降低, $Z_2$ 点的硬度为400 HV0.3左右。与基体上表面的距离继续增大,陶瓷相的渗透作用消失。晶粒细化作用也大幅度减弱,所以 $Z_3, Z_4, Z_5$ 的显微硬度差距不大。TC4合金属于典型的 $\alpha + \beta$ 两相钛合金, ( $\alpha + \beta$ )/ $\beta$ 相变温度范围在970 °C~990 °C之间<sup>[10]</sup>。因此可以将基体分为两个部分(热影响区与非影响区)。温度超过1000 °C的是热影响区( $Z_1, Z_2, Z_3$ ),低于1000 °C的是非影响区( $Z_4, Z_5$ )。热影响区为晶间 $\alpha$ 和全片状转变组织 $\beta$ 组织,非影响区为白色等轴 $\alpha$ 和灰色晶间 $\beta$ 组织,所以该区域显微硬度分布均匀且过渡平缓<sup>[8]</sup>。热影响区与非影响区的金相显微组织如图9所示。

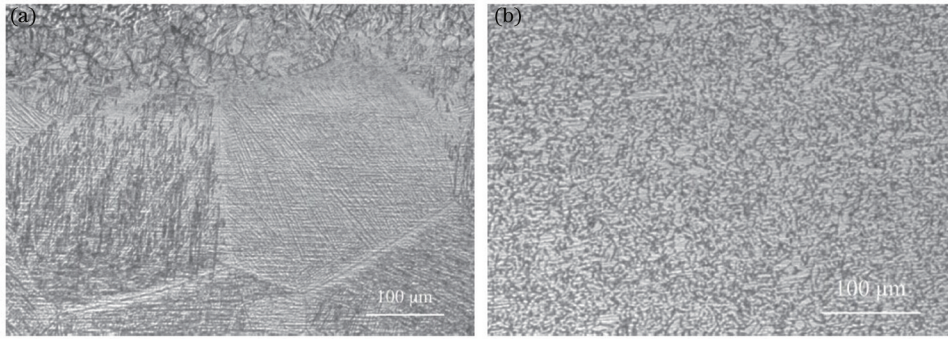


图9 基体截面显微金相组织。(a)热影响区;(b)非影响区

Fig.9 Microstructure substrate section. (a) Heat affected zone; (b) non-heat-affected zone

根据温度场模拟的结果,将基体划分为热影响区与非影响区符合基体的实际情况。模拟结果与实际情况相符合。

### 3.3 涂层物相分析

根据温度场的模拟,涂层与基体结合处的温度较高。在较高激光比能作用下,Ti与空气中的O<sub>2</sub>结合形成TiO<sub>2</sub>,并进一步与CaHPO<sub>4</sub>、CaCO<sub>3</sub>和CaO通过下列反应生成CaTiO<sub>3</sub>。同时,由于温度太高,生成的HA会分解生成TCP。主要的反应式为

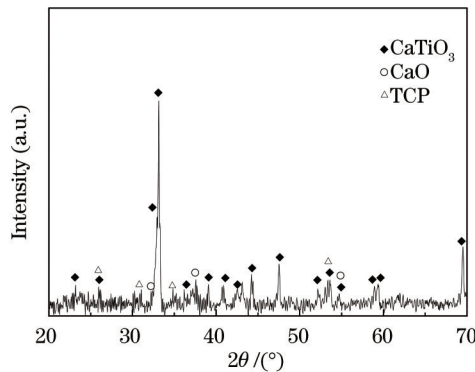
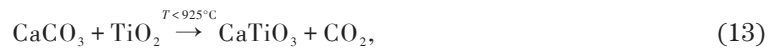
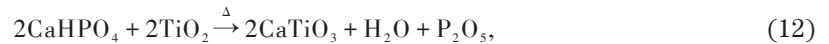


图10 激光熔覆过渡层X射线衍射分析

Fig.10 XRD patterns of the transitional coating

本实验3组试样制备的涂层,将其磨成粉末后做X射线衍射(XRD)分析,所得结果基本一致,试样1的XRD分析如图10所示。涂层中主要成分为CaTiO<sub>3</sub>,另外含有少量CaO和TCP。由于3组实验在激光功率为1800 W、2000 W的情况下制备,其涂层模拟的温度达到了2000℃,已达到了上述反应所需要的温度条件,

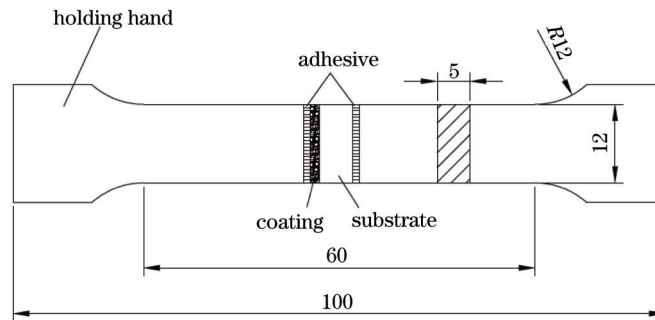


图11 垂直拉伸法示意图

Fig.11 Vertical tensile sketch



所以  $\text{CaTiO}_3$  的含量较高,而过高的温度导致了 P 元素的挥发,因此,涂层中基本不含有 HA 与 TCP 含量。涂层物相的组成符合温度场模拟的结果。

### 3.4 涂层与基体的结合强度

对制备的 3 组试样进行拉伸实验,粘结剂为 E51(618)环氧树脂和低分子 650 聚酰胺树脂按质量 1:1 配比,并加入 5% 促进剂 DMP-30 加快固化速度。垂直拉伸试样粘结夹紧装置如图 11 所示。

3 组实验每组测量 3 个,取平均值,最后测试所得的结果如表 5 所示。

表 5 激光熔覆陶瓷涂层拉伸实验测试结果

Table 5 Tensile test results of laser cladding bio-ceramic coating

Sample	Critical load /N	Bonding strength /MPa
1	1857	30.95
2	1836	30.6
3	1716	28.6

温度场模拟的结果可知,涂层结合处的温度达到了  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ ,超过了 TC4 与涂层中钛粉的熔点。所以涂层与基体之间可以实现冶金结合。实样 1、2 的涂层厚度为  $0.3\text{ mm}$ ,但是在高温条件下 P 元素烧蚀而挥发,从而导致涂层中存在气孔,降低了涂层与基体之间的结合强度。同时  $\text{CaO}$ 、TCP 陶瓷相的存在也在一定程度上降低了涂层的结合强度。实验 3 涂层的厚度为  $0.5\text{ mm}$ ,厚度的增加会导致涂层中气孔的增大,会影响涂层的结合强度,所以实验 3 的结合强度略低于实验 1、2。3 组实验的平均结合强度为 30.95、30.6、28.6 MPa,超过了羟基磷灰石陶瓷涂层与基体的平均结合强度,属于涂层与基体冶金结合的表现,因此符合温度场模拟的结果。

上述 4 个方面都能够很好地符合温度场模拟的结果。因此,温度场模拟结果可靠且可用于指导工艺参数的选择。

## 4 工艺参数选择与模拟预测

### 4.1 工艺参数选择

激光熔覆生物陶瓷涂层为了能够让涂层与基体实现良好的冶金结合,同时不至于温度太高而导致预置粉末烧蚀、涂层中气孔数量增多,因此需要选择合适的工艺参数。用温度场数值计算可得,厚度为  $0.3\text{ mm}$  的预置层在不同工艺参数作用下熔池深度变化如图 12 所示。

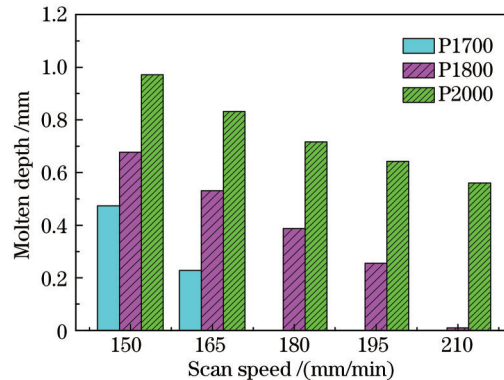


图 12 不同工艺参数条件下熔池深度的变化

Fig.12 Pool depth changes under different process parameters

如图 12 所示,涂层厚度为  $0.3\text{ mm}$  时,在相同的激光功率作用下,熔池深度会随着扫描速度的增加而减小,两者之间的关系近似为线性关系,但是在临界处会出现跳跃变化,如激光功率为 P1800,扫描速度为 V210 时,熔池的深度明显要低很多,这是由于扫描速度过快,导致预置涂层不能较快熔化与基体冶金结合,大大影响了能量的传递。另外,在激光扫描速度相同的情况下,激光功率越高,熔池深度越深。在预置涂层厚度相同、激光比能相近的情况下,激光功率高者具有更深的熔池,比如 P2000/V165(比能  $60.6\text{ J}$ ), P1800/V150(比能  $60\text{ J}$ ) 比能相近,但是 P2000/V165 具有更深的熔池。这是因为高功率的激光能让涂层快速熔化,与

基体形成冶金结合,从而传递大量的热到基体增大熔池的深度。因此需要综合考虑激光功率与激光比能来选择工艺参数。要考虑到涂层既要与基体形成冶金结合,又不能温度过高。最终选择的工艺参数为: $P=1700\text{ W}$ , $V=165\text{ mm/min}$ 。熔池的深度为 $0.228\text{ mm}$ 。

#### 4.2 不同涂层厚度的模拟预测

激光熔覆首先熔化粉末层,然后再熔化基体。因此涂层的厚度将影响工艺参数的选择。表6是不同涂层厚度的几个模拟结果;图13是不同功率、扫描速度在不同预置层厚度时的熔池深度。

表6 不同预置层厚度模拟结果

Table 6 Simulation results of different coating thicknesses

Sample	Preset layer thickness /mm	Process parameters / $[W \cdot (\text{mm}/\text{min})]$	Pool depth /mm	Surface temperature / $^{\circ}\text{C}$
1	0.30	1700, 165	0.228	1990
2	0.35	1800, 180	0.227	2047
3	0.40	1800, 165	0.241	2087
4	0.45	2000, 210	0.196	2152
5	0.50	2000, 195	0.198	2189

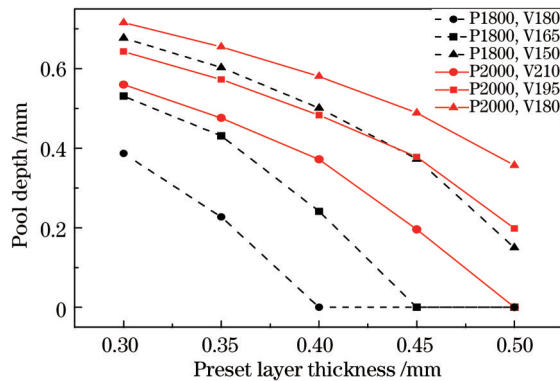


图13 不同工艺条件下预置涂层厚度与熔池的关系

Fig.13 Relationship between preset coating thickness and pool depth under different process parameters

由图13可知,在相同的工艺条件下,随着预置层厚度的增加,熔池的深度会降低。为使基体熔池深度达到相近的水平,需要降低扫描速度或增加激光功率。在相同的工艺条件下,预置涂层的厚度增加,熔池的深度减小,预置涂层的厚度超过一定值时,熔池深度的减小较为明显,此现象在低功率时更为明显。

## 5 结 论

1) 根据温度场模拟的结果可得,激光熔覆预置于TC4上的粉末厚度为 $0.3\text{ mm}$ 时最佳工艺参数为:激光功率 $P=1700\text{ W}$ ,扫描速度 $V=165\text{ mm/min}$ 。

2) 工艺条件相同、预置涂层厚度在一定范围内时,熔池的深度与涂层的厚度近似成线性关系,功率越高,其对应成线性关系的涂层厚度范围越大。

### 参 考 文 献

- Li Lijun. Modern Laser Processing and Its Equipment [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993. 74.  
李力钧. 现代激光加工及其装备[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993, 74.
- Wang Dongsheng, Yang Youwen, Tian Zongjun, *et al.*. Process optimization of thick nanostructured ceramic coating by laser multi-layer cladding based on neural network and genetic algorithm [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0903001.  
王东生, 杨友文, 田宗军, 等. 基于神经网络和遗传算法的激光多层熔覆厚纳米陶瓷涂层工艺优化[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0903001.
- Ni Libin, Liu Jichang, Wu Yaoting, *et al.*. Optimization of laser cladding process variables based on neural network and particle swarm optimization algorithms [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0203003.  
倪立斌, 刘继常, 伍耀庭, 等. 基于神经网络和粒子群算法的激光熔覆工艺参数[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0203003.

- 4 V Ocelik, U de Oliveira, M de Boer, *et al.*. Thick Co-based coating on cast iron by side laser cladding: analysis of processing conditions and coating properties [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 201(12): 5875-5883.
- 5 Deng Chi, Zhang Yaping, Gao Jiacheng, *et al.*. Numerical simulation of temperature field for bioceramic coating clad by laser [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2003, 21(4): 503-506  
邓 迟, 张亚平, 高家诚, 等. 激光熔覆生物陶瓷涂层温度场的数值模拟[J]. *材料科学与工程学报*, 2003, 21(4): 503-506.
- 6 Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding [J]. *Chinese J 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.
- 7 Shi Shihong, Wang Chen, Xu Ai Qin, *et al.*. Temperature field numerical simulation of laser cladding based on internal powder feeding through a hollow laser beam [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0303002.  
石世宏, 王 晨, 徐爱琴, 等. 基于环形激光内送粉激光熔覆温度场的数值模拟[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0303002.
- 8 Zhao Yongqing, Hong Quan, Ge Peng, *et al.*. Titanium and Titanium Alloy Microstructure Map [M]. Changsha: Central South University Press, 2011.  
赵永庆, 洪 权, 葛 鹏. 钛及钛合金金相图谱[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011.
- 9 L Han, F W Liou, K M Phatak. Modeling of laser cladding with powder injection [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2004, 35B:1140-1150.
- 10 Zhang Dongming, Bao Yumei, Gao Haiming, *et al.*. Simulation on laser cladding temperature field of bioceramic coating [J]. *Light Industry Machinery*, 2014, 32(2): 77-81.  
张冬明, 鲍雨梅, 高海明, 等. 激光熔覆生物陶瓷涂层温度场模拟[J]. *轻工机械*, 2014, 32(2): 77-81.
- 11 Li Donglin. Numerical Simulation Research on Welding Stress and Deformation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.  
李冬林. 焊接应力和变形的数值模拟研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- 12 Yan Yuhe, Zhong Minlin. High Power Laser Processing and Its Application [M]. Tianjin: Tianjin Science & Technology Press, 1994.  
闫毓禾, 钟敏霖. 高功率激光加工及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994.
- 13 Chen Gang, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen, *et al.*. The simulation of temperature field of squashing presetting laser cladding and testing of the model [J]. *Applied Laser*, 2010, 30(3): 183-188.  
陈 刚, 黎向锋, 左敦稳, 等. 压片预置式激光熔覆温度场的数值模拟模型及其验证[J]. *应用激光*, 2010, 30(3): 183-188.
- 14 Tang Di, Wang Jin, Jiang Haitao, *et al.*. Microstructure and hardness of the hot rolled TC4 alloy under different heat treatment [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2012, 37(3): 28-32.  
唐 荻, 王 进, 江海涛, 等. 热轧态TC4合金不同热处理后的组织变化及硬度[J]. *金属热处理*, 2012, 37(3): 28-32.