

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.020

激光熔覆生物陶瓷涂层温度场模拟

张冬明, 鲍雨梅, 高海明, 许景顺

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

摘 要:针对生物陶瓷涂层预置粉末式激光熔覆的特点,综合考虑接触热阻、材料物理性能参数、涂层厚度和激光吸收率等因素,建立了熔覆过程温度场的数值模型,对基体熔池尺寸和形状进行了数值计算,并与实验结果进行对比分析。结果表明,模型能较好地反映激光熔覆过程中的温度场分布。激光熔覆过程中,存在明显的热积累现象,且预置粉末层厚度对温度场影响较大。

关 键 词:激光熔覆;数值模拟;温度场;生物陶瓷

中图分类号: TG156

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2014)02-0077-05

Simulation on Laser Cladding Temperature Field of Bioceramic Coating

ZHANG Dongming, BAO Yumei, GAO Haiming, XU Jingshun

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: According to the characteristic of laser cladding with the feed way of pre-placing powder, the numerical simulation of temperature field was conducted in consideration of the thermal resistance, material attribute, coating thickness and laser absorptivity. Comparison of the experimental and calculation results in the way of molten pool depth, width and shape shows that the simulated results obtained by this model agree with the temperature field of laser cladding. The phenomenon of heat accumulation is remarkable during laser cladding. And the effect of pre-placing powders thickness on the temperature field is great.

Key words: laser cladding; numerical simulation; temperature field; bioceramic

激光熔覆生物陶瓷涂层具有结合性能好、稀释率低、基体的热变形小等优点,但同时也存在涂层材料陶瓷相组成复杂以及残余应力的问题。这主要是由于基体材料的熔点与陶瓷材料的分解温度之间的差异以及材料热物理性能之间的差异造成的^[1]。故引入梯度涂层设计概念,通过两次激光熔覆制备由过渡层和陶瓷层组成的生物陶瓷梯度涂层,其中过渡层熔覆材料中加入质量分数为50%钛粉。为使基体表面仅一极薄层熔化,与熔化的涂覆材料实现冶金结合,并使涂覆材料很少被基体材料所稀释,需要严格控制过渡层激光熔覆工艺参数。因此,借助数值模拟方法,对过渡层粉末材料激光熔覆过程的温度场进行计算,获得基体熔化区域,以及各部材料所经历的最高温度以及加热

和冷却速度等大量有关激光加工过程的信息,从而有效地指导工艺参数选择和熔覆层设计。

预置粉末式激光熔覆生物陶瓷涂层的加工过程,可分为粉末熔化和基体加热两个阶段,其中熔覆材料组成将随温度变化而变化。部分模型为简化计算过程而忽略预置层或者将预置层与基体合为一体、简化预置层的材料物理性能参数以及恒定激光吸收率的做法实为不妥。此外,预置层厚度对温度场分布及熔池影响亦尚未进行深入的研究^[24]。

鉴于宽带激光熔覆钛基陶瓷涂层实验的特点,文中利用ANSYS商业软件建立有限元模型,综合考虑接触热阻、材料物理性能参数、涂层厚度和激光吸收率,求解试样温度场分布,并以基体熔池的形状和尺寸验

收稿日期:2013-09-12;修回日期:2013-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51105339);国家自然科学基金资助项目(51275471)

作者简介:张冬明(1988),男,浙江桐乡人,硕士研究生,主要研究方向为生物涂层材料、激光表面改性,E-mail:dngming@163.com;通信作者:鲍雨梅,浙江工业大学机械工程学院教授,E-mail:baoyu@zjut.edu.cn

证模型,从而分析激光功率和扫描速度以及涂层厚度对温度场分布的影响,并指导试验工艺参数选择。

1 模型建立

1.1 激光熔覆过程

预置粉末激光熔覆过程如图1所示。由于基体被粉末所覆盖,激光首先加热粉末,粉末的导热系数很低,在粉末层全部熔化以前,由粉末层向基体的热传导可以忽略。粉末层完全熔化了以后,激光才通过熔化了了的熔覆层加热基体,一旦基体表面熔化,二者才能实现冶金结合。为了简化计算,取模型一半进行计算,如图2所示,并作如下假设:①材料热物理性能参数与温度呈分段线性关系;②整个研究对象表面视为平面;③经典的传热理论适用于激光对材料的相互作用;④由于激光作用时间短,且熔池较浅,不考虑液体内部流动对温度场的影响;⑤忽略预置粉末材料之间及与基体材料在高温下的化学反应作用对温度场的影响;⑥各层材料各向同性。

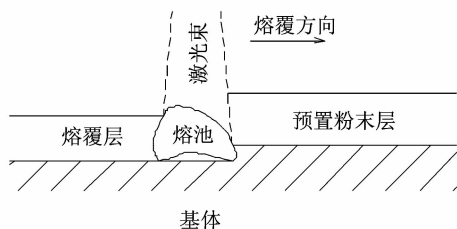


图1 预置粉末激光熔覆过程示意图

Figure 1 Schematic diagram of laser cladding with preplacing powder

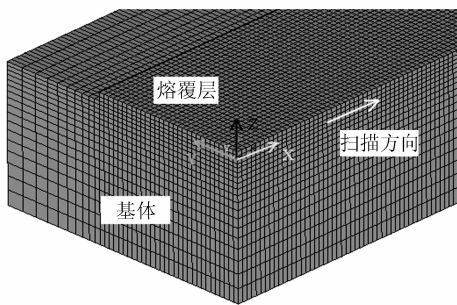


图2 数值模拟模型

Figure 2 Model for numerical simulation

1.2 材料物理性能参数

材料物理性能是数值模拟的前提,与热分析直接相关的参数包括比热容、热传导率、对流换热系数和焓等,而且材料物理性能参数随着温度的变化而变化。基体材料为TC4钛合金(Ti6Al4V),TC4钛合金低温条件下比热和导热系数查阅文献,而高温参数采用外

推法估算^[5]。

预置层粉末材料利用聚乙醇(PVA)粘结剂混合涂敷于基体表面,由多种粉末材料组成,且随着温度的变化而组成变化,其热导率系数、比热容和密度等热物理性能参数由以下公式估算得到^[6]

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

$$c = \sum_{i=1}^n f_i \cdot c_i \quad (2)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \rho_i \quad (3)$$

其中, λ 为材料导热系数, ρ 为材料密度, c 为材料比热容; g_i 为粉末材料的体积分数, f_i 为粉末的质量分数。

此外,预置层粉末较为稀松,而经激光作用熔化后的涂层材料,组织致密,气孔率小,其导热系数既不同于纯固态金属体,也不同于纯绝热层。故熔覆涂层导热系数的估算引入传导热系数麦氏方程

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

其中, λ_p 为涂层的导热系数, λ_m 为纯物质的导热系数, α 为气孔占总体积的比,取值12.5%。

预置层粉末各组成成分材料物理性能参数查相关手册资料,涂层综合物理性能参数估算后如图3所示。

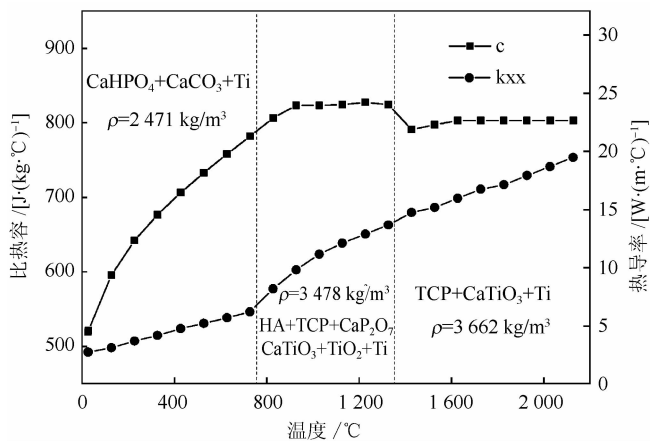


图3 预置层粉末材料物理性能参数

Figure 3 Thermal property parameters of coating

激光熔覆过程中,预置粉末材料与基体表面均在高能激光作用下熔化并形成冶金结合,当激光离开作用区域后快速冷却凝固。可通过定义材料的焓特性来计入潜热,其中焓数值随温度变化,可用密度与比热容的乘积对温度的积分来定义,表达式为

$$\Delta H = \int \rho C(T) dT \quad (5)$$

其中, ρ 为材料密度; H 为热焓($J \cdot m^{-3}$); $C(T)$ 为材

料随温度变化的比热容。

1.3 动态接触热阻

将预置粉末层在激光扫描方向以激光光斑宽度为长度划分成若干块体,定义接触单元 CONTACT174 和目标单元 TARGE170,并将接触单元依附在预置粉末层实体单元上,而目标单元依附在基体实体单元上,需要指出的是,仅对未熔覆区域或者已熔覆但未实现冶金结合的区域进行接触单元设置。若某个接触单元或目标单元内所有节点温度达到材料的熔点,则进入前处理器,删除接触单元,合并预置层粉末与基体互相接触的节点,并再次进入求解器进行加载求解,从而实现预置层与基体冶金结合后传热分析。

影响接触热传导分析的接触热阻值与接触面的表面粗糙度呈近似正比关系,还与接触面材料的热导率有关,计算公式如下^[7]

$$R_l = \frac{2h_f}{k_1\lambda_1 + k_2\lambda_2 + k_3\lambda_3} \quad (6)$$

其中, R_l 为接触热阻/ $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1})$, h_f 为接触表面的轮廓最大高度/ m , λ_1 , λ_2 和 λ_3 分别为预置层、基材和空气的热导率。根据文献,取空气热导率 $\lambda_3 = 0$, $k_3 = 0.696$;反映接触材料表面粗糙度情况的 k_1 和 k_2 分别为 0.289 和 0.113^[8]。

1.4 热源模型与边界条件

利用有限元法进行激光熔覆温度场的模拟,其将熔覆层和基体划分成细小的单元,热源施加于网格和节点上,并对热源的大小和施加方式进行设定,从而实现熔覆热源在空间域上的分布和离散。此外,对于热源在时间域上的分布和离散则根据激光扫描速度来确定照射时间,从而设定热源在网格和节点上施加的时间。鉴于实验采用 12×2 热流均匀分布的矩形光斑,选择二维带状热源模型,其能量密度分布为

$$I = a \cdot P/A \quad (7)$$

其中, a 为基体对激光的吸收率, P 为激光输出功率, A 为光斑面积。数值模拟中,工件表面未达到材料熔点前吸收率 a 取 0.25,溶化后吸收率取 0.5^[9]。而作用时间则根据光斑宽度和扫描速度确定。

至于激光熔覆过程中,工件与周围环境的热交换主要包括对流换热和辐射换热。考虑到工件上表面和各侧面与空气对流换热,其热交换的热流值为

$$q_h = h(T - T_0) \quad (8)$$

其中, h 为表面对流换热系数,一般取 $10 \sim 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,而对称面上 $h = 0$ 相当于绝热。至于基体热辐射引起的能量损耗,为方便建模和计算,将该部分置于对

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以及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。

2 数值模拟结果验证

由于激光熔覆过程基体或者涂层实时温度监测较难,且精度不高,故文中对比激光熔覆试样的截面形貌与模拟模型截面温度场云图以验证数值模拟模型的准确性。激光熔覆实验选用钛合金 TC4 板材作为基体材料,几何尺寸为 $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,并用砂纸打磨待熔覆表面去除氧化层后,用丙酮清洁表面洗掉油污。熔覆材料选用 CaCO_3 粉末和 $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 粉末按照钙磷比 2.0 配比,并混合 50% wt. 纯钛粉末,然后球磨 2 h 使之混合均匀。熔覆材料添加方式采用预置粉末式,利用 5% 聚乙烯醇(PVA)水溶液作为粘结剂将待熔覆材料以不同的厚度预涂于基体表面,并烘干备用。激光熔覆设备选用 5 kW 横流 CO_2 激光器,激光熔覆实验预置粉末层厚度及工艺参数如表 1 所示。

表 1 激光熔覆工艺参数

Table 1 Process parameters of laser cladding

序号	功率 P/W	扫描速度 V / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	光斑尺寸/ mm^2	预置层厚度/ mm
1	1 800	165	12×2	0.3
2	2 000	165	12×2	0.3
3	2 000	150	12×2	0.5

结果验证主要考察熔池深度、形貌和热影响区形貌。为避免激光熔覆起始处由于预热基所引起的温度偏低以及终结处因温度积累引起的温度偏高对结果的影响,试样和模拟模型截面比较对象均取自试样中间处,即 $x = 9 \text{ mm}$ 处横截面。由图 4 熔池形状对比和表 2 熔池深度和宽度数值对比结果可知,不同工艺参数及不同预置层厚度下基体熔池深度、宽度和形状的试验结果和模拟结果都较好的吻合,表明文中的数值模拟模型能够较好地反映陶瓷涂层激光熔覆过程的温度场分布,为激光熔覆过程分析和工艺参数选择提供有效的支持。

表 2 基体熔池深度和宽度对比

Table 2 Comparison of molten depth and width

对比内容	试样 1/mm		试样 2/mm		试样 3/mm	
	深度	宽度	深度	宽度	深度	宽度
实测值	0.660	11.5	0.817	12.0	0.447	11.4
计算值	0.677	11.4	0.832	11.9	0.489	11.6

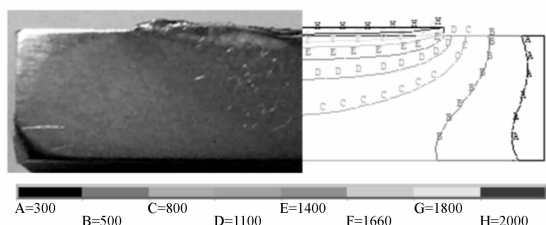
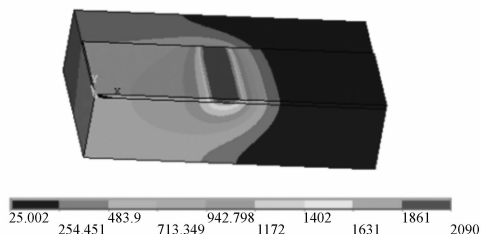
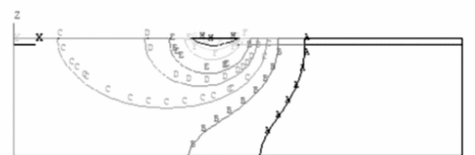


图4 实验一试样 $x=9$ mm 处截面
与模拟结果对比

Figure 4 Comparison of the calculation and
experimental results at $x=9$ mm



(a) 三维温度场分布云图



(b) 纵截面温度等值线图

图5 热源中心在 $x=9$ mm 处的温度场

Figure 5 Temperature field of the heat source center passing the point $x=9$ mm

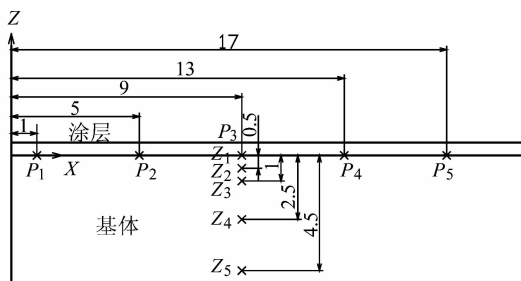


图6 数值模拟结果温度测试点分布图

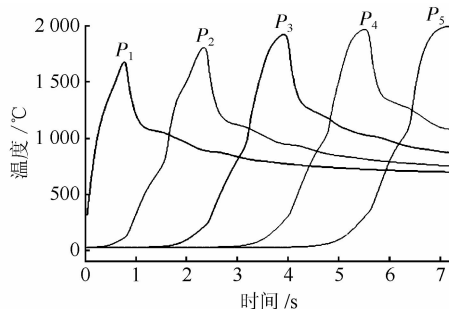
Figure 6 Illustration for the distribution
of temperature testing points

变化时间历程图。由图7(a)可见, X 向节点温度均呈现快速上升并快速下降至某一特定温度后再缓降的变化趋势, 较为符合激光加工的特点。然而, 各节点温升速率逐渐放缓, 且其最高温度依次升高, 并趋近 2000°C , 主要是由于激光束从左向右移动扫描的过程中, 基体材料有一个热积累的过程, 对于未受激光照射区域的节点有预热效应^[10]。可适当提高激光扫描速度, 减少热积累对基体温度变化的影响。图7(b)为热源中心在 $x=9$ mm 处基体横截面上纵向各点的温度时间历程变化, 其最高温度随着离表面距离的增大而减小, 且呈现一定的滞后性, 并最终均趋于 700°C 。这是由于激光光源快速移动, 未能将能量及时传递到整个基体。

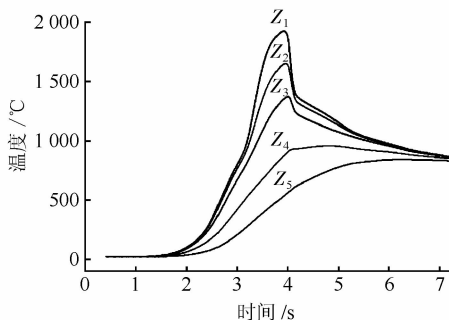
3 模拟结果分析

图5为3.6 s时刻($P=1700\text{ W}$, $V=165\text{ mm/min}$)的温度场分布, 该时刻热源中心在 $x=9\text{ mm}$ 处。其中热源左侧为已熔覆区域, 涂层与基体形成冶金结合, 热源右侧为未熔覆区域, 基体表层尚未熔化而未能与涂层形成结合。由于激光光源自左向右移动, 基体熔池呈典型的药勺型。该工艺条件下, 熔池深度为 0.228 mm , 宽度为 10.6 mm 。

节点 P_1-P_5 和 Z_1-Z_5 在基体上分布如图6所示, 且均位于基体的中心面上, 而图7为节点的温度



(a) 横向节点



(b) 纵向节点

图7 基体关键节点温度变化时间历程图

Figure 7 History curves of the temperature
for test points

不同预置层厚度激光熔覆工艺参数及其模拟结果见表3, 随着预置层厚度的增加, 需要增加激光功率或降低扫描速度, 以增加激光能量输入来熔化更多的材

料,并使基体熔池深度达到相近水平,同时涂层表面温度也会随之上升。然而,过高的温度易使涂层陶瓷相严重烧蚀甚至汽化,以致涂层表面出现蜂窝状孔洞。故需适当设计预置层厚度,并根据预置层厚度合理选择工艺参数。

表3 不同预置层厚度模拟结果

Table 3 Simulated results of different coating thickness

序号	预置层 厚度/mm	工艺参数		熔池深度/ mm	表面温度/ ℃
		功率/W	线速度/ (mm·min ⁻¹)		
1	0.30	1 700	165	0.228	1 990
2	0.35	1 800	180	0.227	2 047
3	0.40	1 800	165	0.241	2 087
4	0.45	2 000	210	0.196	2 152
5	0.50	2 000	195	0.198	2 189

4 结语

综合考虑接触热阻、材料物理性能参数、涂层厚度和激光吸收率,利用 ANSYS 软件建立了生物陶瓷涂层预置粉末式激光熔覆温度场的数值模拟模型。熔池尺寸和形状对比结果表明,该模型计算所得结果能够较好地反映激光熔覆的温度场分布。模拟结果分析表明,激光熔覆过程中熔池形状呈典型的药勺型,且存在明显的热积累现象。此外,熔化越厚的激光熔覆预置

层就需要越多的激光能量,而且会增加涂层表面温度,故需要适当控制预置层厚度,并根据预置层厚度合理选择工艺参数。

参考文献:

- [1] ROY M, KRISHNA B V, BANDYOPADHYAY A, et al. Laser processing of bioactive tricalcium phosphate coating on titanium for load bearing implants[J]. Acta Biomaterialia, 2008,4(2):324-333.
- [2] 朱晨光,孙耀宁,于青.激光熔覆温度场的数值模拟研究进展[J].材料热处理技术,2012,41(8):132-134.
- [3] 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.
- [4] 王春博,董星涛,阮耀波,等.SLS 粉床预热温度场温度补偿方法[J].轻工机械,2010,28(4):37-39.
- [5] 赵永庆,洪权,葛鹏.钛及钛合金相图谱[M].湖南:中南大学出版社,2011.
- [6] HAN L, LIOU F W, PHATAK K M. Modeling of laser cladding with powder injection[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004,35B:1140-1150.
- [7] 沈军,马骏,刘伟强.一种接触热阻的数值计算方法[J].上海航天,2002,19(4):33-36.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 江世好,黎向锋,左敦稳,等.基于预置压片的高温合金激光熔覆温度场仿真[J].兵器材料科学与工程,2011,34(4):23-27.

(上接第 76 页)

2) 弯曲角度越大工具头端面位移方向与 Z 方向的夹角越小,其中 120°工具头端面 Y 方向和 Z 方向的位移接近,为牙种植超声工具弯曲工具头的设计提供参考和依据。

参考文献:

- [1] 刘井权,闫久春,杨士勤.超声刀切割系统的模态分析[J].哈尔滨工业大学学报,2001,33(1):435-438.
- [2] 朱武,张佳民.基于四端网络法的超声变幅杆设计[J].上海电力学院学报,2004,20(4):21-23.
- [3] 朱寅.超声变幅杆有限元谐振分析[J].设计与研究,2005,32(12):13-15.

- [4] 陈颖,周兆英,章刚华.超声手术手柄振动系统的有限元与实验分析[J].压电与声光,2005,27(4):704-707.
- [5] 杨红艳,胡格金.进口节流调速液压系统动态特性数字仿真[J].轻工机械,2011,29(6):66-69.
- [6] 王爱玲,祝锡晶,吴秀玲.功率超声振动加工技术[M].北京:国防工业出版社,2007:105-115.
- [7] 初涛.超声变幅杆的设计及有限元分析[J].机电工程,2009,26(1):102-107.
- [8] 张义民.机械振动[M].北京:清华大学出版社,2007:195-200.
- [9] 张可听,张向慧,高炬.带有加工工具的超声复合变幅杆的优化设计[J].机械设计与制造,2011,11(11):33-35.
- [10] 郑书友,徐西鹏.功率超声工具振幅测量方法比较[J].振动与冲击,2008,27(7):178-181.