

预热温度对激光熔凝 RuT300 温度场的影响规律

庞铭^{1*}, 张啸寒¹, 刘光², 谭雯丹¹, 付威¹, 江国业¹

¹中国民航大学机场学院, 天津 300300;

²中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103

摘要 利用 ANSYS 有限元模拟软件, 建立了激光熔凝 RuT300 三维实体有限元模型, 考虑了激光吸收率、材料热物性参数及相变潜热的影响, 通过分析不同预热温度下激光熔凝的瞬态温度场, 获得预热温度对温度分布、温度梯度、冷却速率等的影响规律。结果表明, 随着预热温度的增大, 试样相同位置处的最高温度增大, 预热温度对试样下部的温度场影响更明显; 随着预热温度的增大, 试样相同位置处的温度梯度减小, 当距离试样上表面的深度达到约 2 mm 时, 试样的温度梯度受预热温度的影响不明显; 对试样进行预热处理可降低试样的冷却速率, 冷却速率随着预热温度的增大而减小。

关键词 材料; 金属; 预热温度; 激光熔凝; 温度场; RuT300

中图分类号 TG163

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.071601

Effect of Preheating Temperature on Temperature Field of Laser Melting RuT300

Pang Ming^{1*}, Zhang Xiaohan¹, Liu Guang², Tan Wendan¹, Fu Wei¹, Jiang Guoye¹

¹Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²Ningbo Branch, China Academy of Ordnance Science, Ningbo, Zhejiang 315103, China

Abstract Based on the ANSYS finite element simulation software, a three-dimensional solid finite element model of laser melting RuT300 is established, in which the effects of laser absorption rate, thermophysical parameters of materials and latent heat of phases are all considered. The effect law of preheating temperature on temperature distribution, temperature gradient, cooling rate, and so on is obtained by the analysis of the transient temperature fields of laser fusion under different preheating temperatures. The results show that the maximum temperature at the same position increases with the increase of preheating temperature. The preheating temperature has a more obvious influence on the temperature field at the low part of the sample. With the increase of preheating temperature, the temperature gradient at the same position of the sample decreases. When the depth from the upper surface of the sample is about 2 mm, the temperature gradient of the sample is not obviously influenced by preheating temperature. In addition, the preheating treatment of samples can be used to reduce their cooling rates, and it is found that the cooling rate decreases as preheating temperature increases.

Key words materials; metals; preheating temperature; laser melting; temperature field; RuT300

OCIS codes 160.3900; 140.3460; 140.3390

1 引言

随着新型动力的研发, 发动机的紧凑性和功率密度进一步提升, 为了满足动力结构的紧凑性, 气缸

盖与气门座采用整体成型工艺^[1]。为了满足新型动力恶劣的工作环境, 需对发动机燃烧室部件材料进行优选, 以提升其可靠性。蠕墨铸铁(RuT300)具有热塑性好、热导率高、弹性模量低等优良高温力学性

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-10-08; 录用日期: 2018-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(U1633111, 51206179)、中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122018D020)、中国民航大学“蓝天青年学者计划”

* E-mail: pangming1980@126.com

能,因此被选为气缸盖材料;但该材料不耐冲击和磨损,因此,需要采用特殊工艺对与气缸盖整体成型的气门座进行强化^[2-5]。激光具有功率密度高、可控性好,能够显著提升材料被强化区域的力学性能,可实现对局部区域的精确强化,且保持较高光洁度等诸多优点。激光熔凝工艺可显著提升被强化材料的硬度,增强其耐磨和耐蚀性能,在航空航天、汽车制造等领域应用广泛。然而,激光强化区域的综合力学性能与激光参数、材料热物性参数、及材料是否预热等因素密切相关,且在激光熔凝作业前对材料预热可改变材料在激光强化过程中的时间及空间温度分布。因此,材料预热可以影响激光强化过程中激光与材料之间的热力耦合,从而影响激光熔凝的强化质量。采用实验的方法在分析探究激光熔凝温度场方面存在一定的局限性,难以获得工艺强化过程中材料组织复杂转变过程的温度分布情况,基于有限元的思想并结合仿真模拟软件方法,已成为诸多学者进行激光熔凝温度场研究的有效方法^[6-9]。

目前已有多篇关于预热温度对材料性能影响的相关报道,主要针对激光熔覆及焊接工艺的相关研究。闫世兴等^[10]采用实验的方法研究了不同基体预热温度下制备的 NiCuFeBSi 合金熔覆层白口组织、结合界面元素分布及抗拉强度;丁林^[11]利用 SYSWELD 有限元仿真软件模拟了不同预热温

度下钴(Co)基合金熔覆层的温度场及应力场;张群兵等^[12]采用插销试验的方法对 12Cr10Co3W2Mo 耐热钢在不同预热温度下焊接接头粗晶区临界断裂应力进行了研究;李美艳等^[13]采用有限元的方法分析了不同预热温度对激光熔覆 Ni-WC-Cr₃C₂ 涂层的热应力影响;陈智等^[14]基于有限元的思想,获得了不同预热温度下能熔透母材的最低焊接线能量。

目前,尚未见关于预热温度对激光熔凝 RuT300 温度场影响规律的相关报道。本文利用 ANSYS 有限元模拟软件,研究了不同预热温度对激光熔凝强化 RuT300 瞬态温度场的影响规律,可为工程实际中利用激光熔凝工艺强化 RuT300 提供参考数据。

2 激光熔凝强化 RuT300 数值模型

2.1 激光熔凝有限元模型

在 ANSYS 有限元仿真模拟软件中,选用三维实体 solid70 六面体八节点热单元建立激光熔凝 RuT300 试样的有限元模型,如图 1(a)所示。为了提高仿真精度,对激光扫过的区域进行精细划分,细化过的网格尺寸为 0.5 mm;为了提高运算速度,对模型其余区域进行粗略划分,模型尺寸如图 1(b)所示。

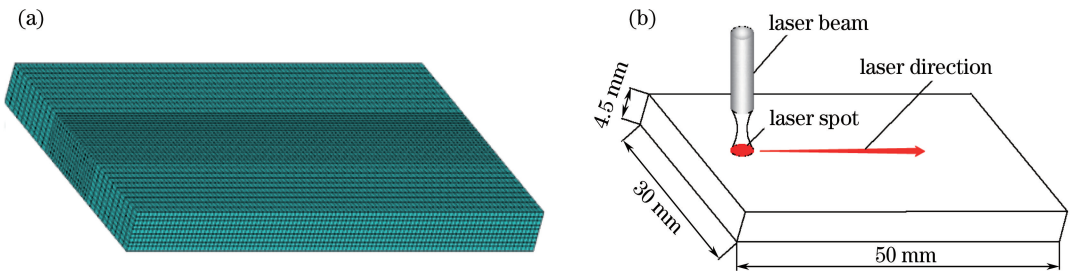


图 1 激光熔凝模型。(a)有限元模型;(b)物理模型

Fig. 1 Models of laser fusion. (a) Finite element model; (b) physical model

2.2 激光熔凝温度场控制方程

激光熔凝 RuT300 试件形成的温度场是一个三维瞬态温度场,该瞬态温度场控制方程^[15]为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: T 为材料温度; t 为时间; λ 为材料导热系数; ρ 为材料密度; C 为材料的比热容; Q 为有关内部热源及潜热效应项; x 、 y 及 z 为传热方向标识,其中 λ 、 ρ 、 C 均为温度的函数。

2.3 激光熔凝热源及换热边界条件

2.3.1 激光强化区域激光热源及边界条件

保持激光熔凝过程的工艺参数恒定,即激光功率为 2500 W,激光扫描速度为 10 mm/s,激光光斑半径为 1 mm,则激光功率密度可表示为^[15]

$$q = \eta \frac{P}{\pi R^2}, \quad (2)$$

式中: q 为激光功率密度; P 为激光功率; R 为激光光斑半径; η 为材料对激光的吸收率。

在 ANSYS 有限元仿真软件的模拟计算过程中,

采用平顶激光束,并将激光热源通过面载荷的方式加载于激光光斑上,试样上表面的能量输入方程为^[16]

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} s_x + \frac{\partial T}{\partial y} s_y + \frac{\partial T}{\partial z} s_z \right) = q(x, y, z, t), \quad (3)$$

式中: s_x 、 s_y 、 s_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的方向余弦。

2.3.2 非激光强化区域的热边界条件

在激光束作用区域之外,考虑到材料自身的导热及材料与外界环境的对流换热,在激光熔凝作业开始前,设定如下:1) 气门座试样的初始温度与周围环境温度保持一致,为 25 °C;2) 试样表面换热均匀;3) 试样材料的底面与耐火砖接触,试样底面为绝热状态。则试件底面与外界的换热表达式为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} s_z = 0. \quad (4)$$

试件侧面与外界环境进行对流换热,在 ANSYS 有限元仿真模拟软件中,激光的热流密度与对流换热系数无法同时加载于同一个单元上,为提升仿真精度,将对流换热边界加载于 surf152 表面效应单元上,其与外界换热方程为^[16]

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} s_x + \frac{\partial T}{\partial y} s_y + \frac{\partial T}{\partial z} s_z \right) = \mu(T_s - T_0), \quad (5)$$

式中: T_s 为周围介质温度; T_0 为试件已知边界上的温度; μ 为对流换热系数,包括热对流及热辐射^[15]。当 $T_s < T_0 < 500$ °C 时, $\mu = 0.0668T$;当 $T_0 > 500$ °C 时, $\mu = 0.231T - 82.1$ 。

2.4 试样材料的热物性参数

试样材料选择 RuT300,材料的热导率、比热容、密度等热物性参数均为温度的函数,模型考虑了 RuT300 材料的热物性参数随温度的变化。通过实验测得材料在不同温度下的热物性参数,通过插值法及外推法获得未知温度下材料的热物性参数,如表 1 所示。在 ANSYS 仿真模拟软件中,通过提高材料的热导率来模拟试样上表面熔池的对流换热^[17]。

表 1 RuT300 的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of RuT300

Temperature / °C	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Specific heat capacity / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)
25	42.37	465
200	43.34	555
400	41.03	645
600	38.02	787
800	37.05	872
1000	35.39	978
1200	65.01	1085

2.5 激光熔凝相变潜热的处理

在激光熔凝强化 RuT300 试样的过程中,试样经历了由固相转变为液相,再由液相冷凝转变为固相的相变过程,该过程伴随着相变潜热的产生。在 ANSYS 模拟运算过程中,通过焓值来表示激光熔凝过程的相变潜热,焓值的计算方法采用热焓法^[18],表示为

$$H = \int \rho C(T) dT, \quad (6)$$

式中: H 为焓值。

3 数值模拟结果与讨论

图 2 为激光熔凝时间 $t = 2.4$ s 时刻,不同预热温度下试样上表面激光熔凝瞬态温度场云图。由图 2 可知,试样预热温度不同,得到的温度场形貌不同;试样预热温度越高,试样上表面的最高温度越高。这是由于试样的温度分布与输入能量、试样与外界的换热以及材料的热物性参数等密切相关,随着试样预热温度的提升,试样上表面相同激光加热区域从初始室温升高至预热温度所需能量减少,因此在输入激光能量相同的条件下,激光熔凝作业前试样材料的预热温度越高,用于提升加热区域到更高温度的激光能量就越多。

为了研究不同预热温度对试样不同深度温度场的影响规律,在 $t = 2.4$ s 时刻,以试样上表面最高温度所在位置为起始点,沿试样纵断面选取一条监测路径(图 3),不同预热温度下路径温度的变化情况如图 4 所示。由图 4 可知,试样在不同深度处的温度不同,且随着深度的增加,最高温度降低。这是由于激光能量的传递是一个由表及里的过程,激光辐照在试样上表面的瞬间,热量迅速由试样表面通过材料热传导作用传递到试样内部,从而导致热量在传递的过程中不断递减。在试样同一深度处的温度随预热温度的不同发生变化,且随着预热温度地增加而增大。这是由于不同预热温度使得试样在预热作用结束时达到的恒稳态温度场不同,预热温度高的试样温度高,预热温度低的试样温度低,因此在激光熔凝过程开始后,由于温度的累加,在试样不同深度处达到的温度也不同。如图 5 所示,随着深度增加,温度梯度减小;在试样同一位置,随着初始温度增加,温度梯度减小;当深度达到约 2 mm 处时,试样的温度梯度受试样初始温度的影响不明显。

ANSYS 软件通过选取节点的方式定义监测路径。如图 6 所示,在试样模型上表面由下往上选择

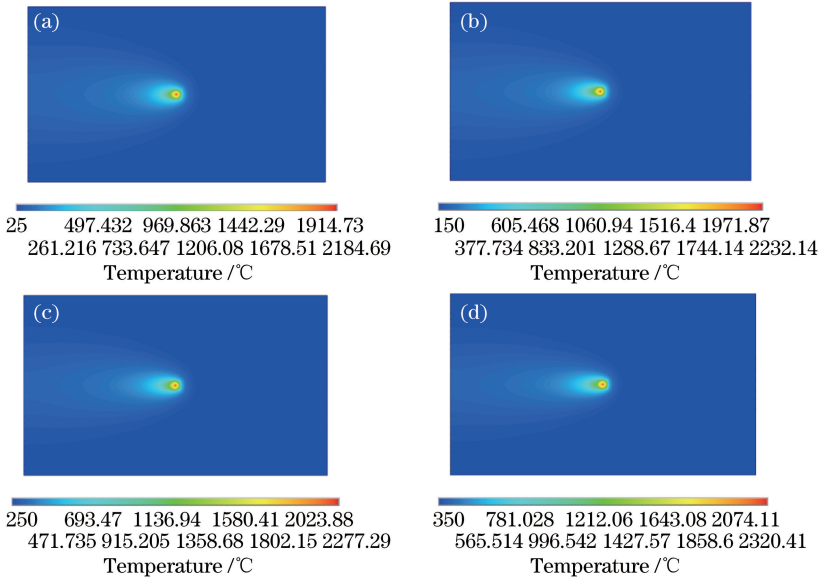


图 2 不同预热温度下激光熔凝温度场云图。(a) 25 °C; (b) 150 °C; (c) 250 °C; (d) 350 °C
 Fig. 2 Cloud maps of temperature fields for laser fusion under different preheating temperatures.
 (a) 25 °C; (b) 150 °C; (c) 250 °C; (d) 350 °C

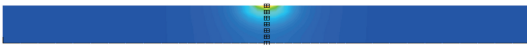


图 3 纵断面路径位置示意图

Fig. 3 Schematic of path position in longitudinal section

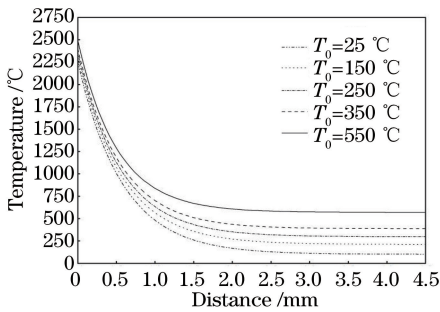


图 4 纵断面监测路径温度变化曲线

Fig. 4 Temperature changes along monitoring path in longitudinal section

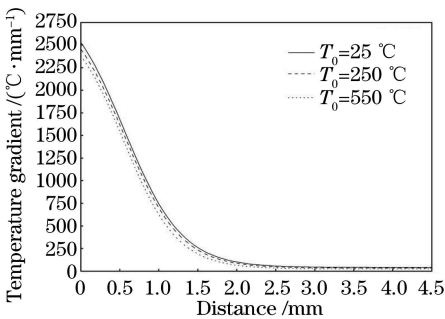


图 5 纵断面监测路径温度梯度变化曲线

Fig. 5 Temperature gradient changes along monitoring path in longitudinal section

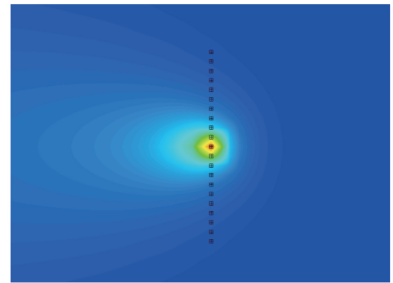


图 6 上表面监测路径位置示意图

Fig. 6 Schematic of monitoring path position on upper surface

节点定义路径,分析试样在不同预热温度下同一深度处,监测路径温度随时间的变化规律。由图 7 可知,同一深度不同位置的温度不同,监测路径中心处温度最高,中心点两侧温度逐渐降低;且随着试样初

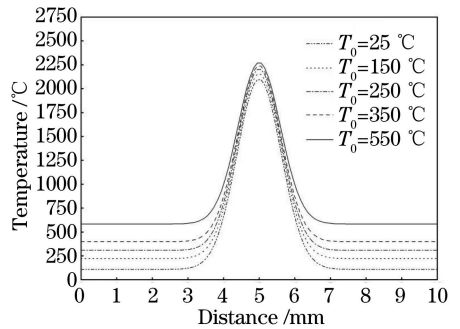


图 7 上表面监测路径温度变化曲线

Fig. 7 Temperature changes along monitoring path on upper surface

始温度的增加,试样同一深度相同位置处的温度增加。这是由于随着试样预热温度的增加,激光熔凝过程的起始温度增加。考虑到试样模型的对称性,以所选路径最高温度所在位置为分割点,选取路径的上部分分析其温度梯度的变化情况,如图8所示,随着距离起始点距离的增加,温度梯度发生变化,从距离起始点约3 mm处开始,温度梯度逐渐增大,在4.5 mm的位置处温度梯度达到最大值,之后随着距离的增加温度梯度降低;且试样预热温度越高,温度梯度越小。对金属材料而言,温度梯度的降低可以减少激光熔凝过程的热应力,进而抑制材料裂纹的产生。由图8和图5可知,纵断面监测路径的最大温度梯度约为 $2500\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}^{-1}$,且大于上表面监测

路径的最大温度梯度(约为 $1700\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}^{-1}$)。

为了研究不同预热温度对试样不同深度温度场的影响,在 $t=2.4\text{ s}$ 时刻的试样纵断面上,分别选取距离上表面 0.5、1.5、2.5、4 mm 的平面中心点为 4 个监测点,标号为①~④,监测点位置如图9所示。图10为不同预热温度下监测点的温度变化曲线。由图10可知,预热温度对 0.5 mm 和 1.5 mm 处监测点的温度变化影响较小,其中 0.5 mm 处的监测点在 2.5~2.7 s 时间段内,不同预热温度下监测点温度变化曲线近似重合;而对于 2.5 mm 与 4 mm 处的监测点,随着预热温度的增大,监测点的温度变化曲线逐渐趋于平直。这是由于激光与试样材料间的交互作用使激光对试样材料局部进行加热和冷却,激光辐照试样材料的瞬间,激光热量由试样表面经热传导作用传递到试样材料内部,且随着时间的增加,材料的温度均匀性提高。综上所述,预热温度对试样下部的温度场影响更为明显。RuT300 的熔点为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[18],如图10(a)所示,不同预热温度下,熔池内保持熔融态的时间不同,随着试样预热温度的增加而增加。

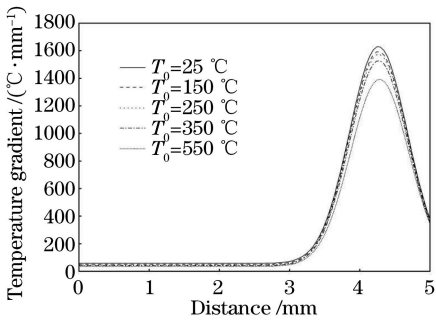


图8 上表面监测路径温度梯度变化曲线

Fig. 8 Temperature gradients along monitoring path on upper surface

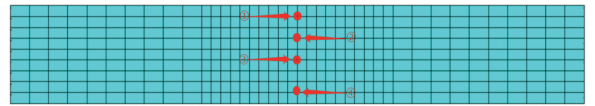


图9 监测点位置示意图

Fig. 9 Position diagram of monitoring points

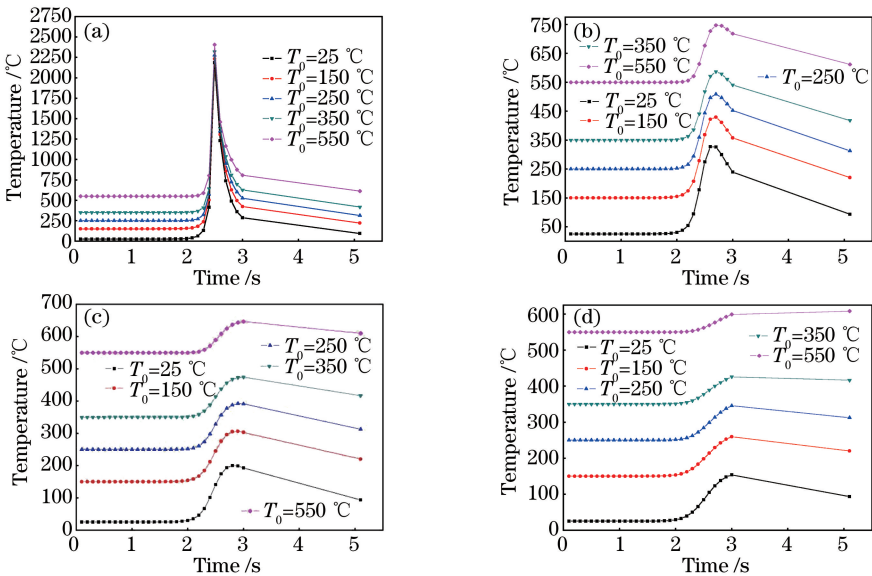


图10 不同预热温度下,距离上表面不同距离的监测点的温度变化曲线。(a) 0.5 mm;(b) 1.5 mm;(c) 2.5 mm;(d) 4 mm

Fig. 10 Temperature changes of monitoring points with different distances away from upper surface under different preheating temperatures. (a) 0.5 mm; (b) 1.5 mm; (c) 2.5 mm; (d) 4 mm

图11为不同预热温度下不同深度的温度变化曲线。由图11可知,激光熔凝强化试样过程是

一个温度快速升高、快速降低的过程;试样预热温度不同,激光熔凝过程达到熔点的时间不同,常温

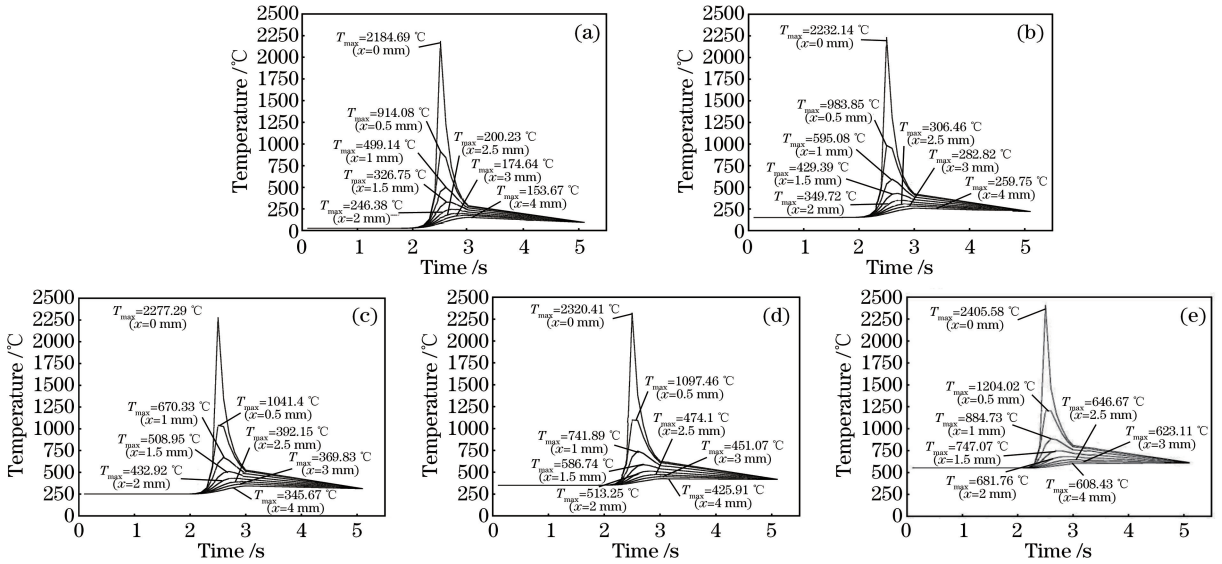


图 11 不同预热温度下,不同深度处的温度变化曲线。(a) 25 °C ;(b) 150 °C ;(c) 250 °C ;(d) 350 °C ;(e) 550 °C

Fig. 11 Temperature changes at different depths under different preheating temperatures.

(a) 25 °C ; (b) 150 °C ; (c) 250 °C ; (d) 350 °C ; (e) 550 °C

下激光熔凝过程开始后约 2.5 s 达到熔点,预热温度为 550 °C 时,约 2.2 s 达到熔点。上述结果表明,在激光熔凝作业开始前对试样材料进行预热,可缩短材料达到熔点的时间,且预热温度越高,材料达到熔点的时间越短。以图 11 中试样深度为 1 mm 处的温度随时间变化曲线进行计算,得到不

同预热温度下对应的最大冷却速率,结果如表 2 所示。由表 2 可知,在激光熔凝作业前未对试样材料进行预热时,该深度处的瞬时冷却速率较大,随着试样预热温度的提高,冷却速率降低,说明在激光熔凝过程开始前对试样进行预热可降低试样的冷却速率。

表 2 不同预热温度下的冷却速率

Table 2 Cooling rates under different preheating temperatures

Temperature / °C	25	150	250	350	550
Cooling rate / (°C · s ⁻¹)	542.7969	407.5731	331.2996	250.6672	104.6654

4 结 论

利用 ANSYS 有限元仿真模拟软件,研究了不同预热温度对激光熔凝强化 RuT300 的温度场的影响。结果表明,在距离试样上表面相同深度处,不同预热温度对应试样相同深度处的最高温度不同,且随着预热温度的增加,试样相同位置的最高温度增加,预热温度对试样下部的温度场影响更为明显;在距离试样上表面相同深度处,随着预热温度增加,温度梯度减小,当深度达到约 2 mm 处时,试样的温度梯度受预热温度的影响不明显;在激光熔凝过程开始前对试样进行预热,可降低试样的冷却速率,且随试样预热温度的增加,试样的冷却速率减小。

发动机, 2004(3): 5-7, 11.

[2] Wu Y, Li J P, Zhang Y J, *et al.* Effect of heat treatment on mechanical properties and thermal conductivity of RuT300 vermicular graphite cast iron [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(2): 143-151.
 武岳, 李建平, 张延京, 等. 热处理工艺对 RuT300 蠕墨铸铁力学性能与导热性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2017, 38(2): 143-151.
 [3] Zhang X X, Zhang G W, Xu H. Melting technology research of vermicular graphite cast iron of RuT300 [J]. Foundry Technology, 2012, 33(10): 1200-1202.
 张馨心, 张国伟, 徐宏. RuT300 蠕墨铸铁熔炼工艺研究 [J]. 铸造技术, 2012, 33(10): 1200-1202.
 [4] Shy Y H, Hsu C H, Lee S C, *et al.* Effects of titanium addition and section size on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron [J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 278(1/2): 54-60.

参 考 文 献

[1] Zhang Y S. High power density diesel engine and its key technologies [J]. Vehicle Engine, 2004(3): 5-7, 11.
 张玉申. 高功率密度柴油机及其关键技术 [J]. 车用

- [5] Li B H, Du X. Application of CGI in the parts and components of diesel engine[J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology, 2001(2): 1-6,8.
李炳华, 杜欣. 蠕墨铸铁在柴油机部件上的应用[J]. 国外机车车辆工艺, 2001(2): 1-6,8.
- [6] Yi P, Liu Y C, Shi Y J, *et al.* Numerical simulation of dynamic laser melting behavior and temperature field on cast iron surface [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(8): 81-84, 117.
伊鹏, 刘衍聪, 石永军, 等. 铸铁表面激光熔凝行为及温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2011, 32(8): 81-84, 117.
- [7] Wang W, Liu Q, Yang G, *et al.* A numerical simulation for fluid flow and temperature field in the molten pool of laser cladding on titanium alloy [J]. Applied Laser, 2014, 34(5): 389-394.
王维, 刘奇, 杨光, 等. 钛合金激光熔凝熔池流场及温度场的数值模拟[J]. 应用激光, 2014, 34(5): 389-394.
- [8] Zhang C Y, Yang W, Ma C. Numerical simulation of temperature field in laser surface remelting rare earth magnesium alloy and its corrosion resistance[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(2): 143-147, 154.
张春燕, 杨武, 马超. 激光熔凝稀土镁合金温度场的数值模拟及其耐腐蚀性能[J]. 热加工工艺, 2017, 46(2): 143-147, 154.
- [9] Han T, Wang Y. FEM simulation of laser melting of CK₄₅ steel[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(16): 80-83.
韩涛, 王勇. CK₄₅钢激光熔凝有限元模拟[J]. 热加工工艺, 2007, 36(16): 80-83.
- [10] Yan S X, Dong S Y, Xu B S, *et al.* Effect of preheating temperature on microstructure and property of laser clad Ni-based alloy coating on gray cast iron substrate [J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(1): 30-36.
闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. 预热温度对灰铸铁表面激光熔覆镍基涂层组织与性能的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(1): 30-36.
- [11] Ding L. Effect of preheating on numerical simulation of Co based alloys by laser cladding[J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2013, 5(3): 95-100.
丁林. 预热温度对激光熔覆 Co 基合金数值模拟的影响[J]. 南阳理工学院学报, 2013, 5(3): 95-100.
- [12] Zhang Q B, Niu J, Zhao P F, *et al.* Influence of preheating temperature on cold cracking sensitivity of 12Cr₁₀ Co₃W₂Mo heat resistant steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 87-91, 117-118.
张群兵, 牛靖, 赵鹏飞, 等. 预热温度对 12Cr₁₀ Co₃W₂Mo 耐热钢焊接冷裂纹敏感性的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 87-91, 117-118.
- [13] Li M Y, Cai C B, Han B, *et al.* Numerical simulation of preheating on temperature and stress fields by laser cladding Ni-based ceramic coating [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(12): 197-203.
李美艳, 蔡春波, 韩彬, 等. 预热对激光熔覆陶瓷涂层温度场和应力场影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(12): 197-203.
- [14] Chen Z, Jiao X D, Luo Y, *et al.* Finite element analysis on influence of welding heat input under different preheat-temperatures based on SYSWELD software [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(15): 164-166.
陈智, 焦向东, 罗雨, 等. 基于 SYSWELD 的预热温度对焊接热输入影响的有限元模拟[J]. 热加工工艺, 2014, 43(15): 164-166.
- [15] Xi M Z, Yu G. Numerical simulation for the transient temperature field of 3D moving laser molten pool [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(12): 1527-1532.
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.
- [16] Zhang Z, Han B, Wang Y, *et al.* Effects of the shape of workpiece on temperature and stress field distribution during laser transformation hardening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0803001.
张哲, 韩彬, 王勇, 等. 工件形状对激光相硬化温度场和应力场的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0803001.
- [17] Derakhshan E D, Yazdian N, Craft B, *et al.* Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 104: 170-182.
- [18] Tan W D, Pang M, Jiang G Y, *et al.* Numerical simulation of laser transformation hardening temperature field of high-enhanced diesel engine valve seat [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111601.
谭雯丹, 庞铭, 江国业, 等. 高强度柴油机气门座激光相硬化温度场数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111601.