

基于温度特征的单道激光熔覆翘曲变形

宫新勇¹, 高士友², 咸士玉³, 于润祥¹

¹华北科技学院机电工程学院, 河北 廊坊 065201;

²燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066000;

³长治清华机械厂, 山西 长治 046000

摘要 针对同步送粉式单层单道激光熔覆过程, 利用已验证的有限元模型和 ANSYS 软件分析了其温度场特征。依据加热区-脉冲区的分界点和任意时刻基板上表面温度曲线的峰值点, 以两几何平面截取单道熔覆模型, 获得用于翘曲变形分析的截面体。通过分析熔覆层上表面以及基板上、下表面在整个熔覆过程中的应力/应变状态, 发现该截面体模型会依次出现反向、正向弯曲, 熔覆零件在宏观上则表现为朝向激光束的翘曲变形。最后对单道熔覆过程基板翘变的原因进行了归纳总结。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 翘曲变形; 数值模拟; 单道模型; 温度特征

中图分类号 TG142 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.101410

Warp Deformation in Single-Track Laser Cladding Based on Temperature Characteristics

Gong Xinyong¹, Gao Shiyu², Xian Shiyu³, Yu Runxiang¹

¹ School of Mechanical-Electrical Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang, Hebei 065201, China;

² School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066000, China;

³ Changzhi Qinghua Machinery Factory, Changzhi, Shanxi 046000, China

Abstract The temperature field characteristic of single-layer single-track cladding with synchronous powder feeding is analyzed by using the verified finite element model and the ANSYS software. According to the heating-pulse zone demarcation points and the peak points of the temperature curve on the upper surface of base at any moment, the section body for the warp deformation analysis is obtained by using two geometric planes to intercept the single-track cladding model. By analyzing the stress/strain states of the upper surface of the cladding layer and the upper and lower surfaces of the base, it is found that the reverse and forward bending occur successively on the section body. The cladding part exhibits deformation toward the laser beam macroscopically. Finally, the reasons for the warp deformation in the single-track cladding process are summarized.

Key words laser technique; laser cladding; warp deformation; numerical simulation; single track model; temperature characteristics

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 310.1860

1 引言

激光熔覆技术是一种新兴表面改性技术,其加工原理是利用激光束能量逐点熔化基体,再添加熔覆材料使基体迅速熔凝^[1]。采用该加工技术会使工件内部形成不均匀的温度场,其特征可简单概括为局部受热条件下幅值不等的循环温变过程^[2]。另外,各局部区域在受热膨胀、冷却收缩不一致的情况下会相互牵制,产

收稿日期: 2017-05-19; **收到修改稿日期:** 2017-05-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(3142015012,3142015097)

作者简介: 宫新勇(1984—),男,博士,讲师,主要从事钛合金零件激光熔化沉积修复方面的研究。

E-mail: huagu1984@126.com

生热应力。对于存在固态相变的熔覆材料,温度载荷不仅会引起显微组织变化,还会引起相变应力^[3]。因此,熔覆零件内部温度场、显微组织、内应力(瞬时应力、残余应力)三者间存在复杂的耦合作用关系。当材料的内应力超过其屈服强度时,部分应力便以塑性变形的方式释放,表现为熔覆零件的翘曲变形,进而降低熔覆零件的结构刚性和尺寸稳定性^[4]。

近年来,广大学者对此问题展开了大量的理论与实验研究工作。杨建^[5]采用小孔释放法分别对 Ni20 和 316L 不锈钢多层熔覆试样进行了残余应力测试,结果表明,残余应力主要为平行于扫描方向的拉应力,而垂直于激光扫描方向的应力相对较小,且随熔覆层的增加,残余应力具有从拉应力转变为压应力的趋势。张凯等^[6]基于熔池监测系统采集的熔池数据,解释了试样的变形原因,发现翘曲变形主要发生在沉积初始阶段。罗明贤等^[7-8]通过数值模拟的方法,获得了激光熔覆过程的应力/位移场分布,发现熔覆层及附近基板区域会产生塑性变形,而基板其他区域仅发生刚性位移,且激光扫描速度和搭接率对熔覆层的应力场分布以及基板变形程度有着显著影响。目前,在弯曲机理方面,以控制板材变形大小和方向为目的的激光弯曲柔性加工技术已具有较为成熟的理论体系,如温度梯度机理、弯曲机理、增厚机理等,其中温度梯度机理认为,在激光束的辐照及关闭过程中,板材会依次发生背离、朝向激光束的弯曲变形^[9],这对激光熔覆翘曲变形的机理研究具有积极的借鉴意义。

熔覆零件应力/应变状态的影响因素包括材料特性、激光扫描方式、光斑能量分布、基材温度、工艺参数等^[10],可采取相应的工艺措施减小熔覆基板的翘曲变形程度,例如选择膨胀系数小的熔覆合金、采用由外到内的螺旋扫描方式、预热基材等。目前,此领域的研究工作大多利用实验或数值模拟手段研究熔覆零件的应力/应变分布规律^[11-13]。事实上,上述各因素与应力/应变之间并不存在直接的作用关系,而是通过温度载荷间接影响后者。因此,本文从温度场的分布特征出发,逐步分析了熔覆零件的应力/应变状态演变及宏观翘曲变形过程,探究了更深层次的热应力产生机理和基板变形原因。

2 模型的建立

首先对较为简单的单层单道激光熔覆过程展开研究,选择在 45 钢基板(80 mm×25 mm×10 mm)表面 x 方向进行 316L 不锈钢粉末的同步送粉式单道激光熔覆,覆层尺寸为 60 mm×4 mm×0.3 mm,使基板在宽边方向(y 向)的几何对称面重合于 $x-z$ 几何平面上,取物理模型在 y 方向的一半进行实体建模。工艺参数为激光功率 $P=2000$ W,扫描速度 $V=4$ mm·s⁻¹,送粉率 $V_f=3$ g·min⁻¹,总熔覆时间 $t=15$ s。

有限元模型的建立过程与文献^[14-15]一致,包括假设及简化条件、材料热物性参数(激光吸收率、相变潜热、比热、焓值、对流系数、导热系数)的处理、初始条件、边界条件、网格划分方式等,将相关数据写入 APDL 程序,随后利用 ANSYS 软件求解其温度场。文献^[14]对相同有限元模型的正确性进行了实验验证。

该温度场有限元模型的边界条件有三类:1) 激光束作用区域内的热流密度;2) 与空气接触表面的对流换热;3) 基板下表面与垫板之间的导热。在随激光束移动逐点添加材料的同步送粉过程中,未熔覆区域的覆层材料不参与整个物理域的传热,保持初始环境温度为 20 °C,相应的基板上表面区域应为空气对流的热边界条件,对此使用了 ANSYS 有限元软件的“生死”单元技术^[16]。首先将全部熔覆层单元“杀死”(以缺省值为 1×10^{-6} 的因子乘以其刚度矩阵),仅加载热流密度的“死”单元会被“激活”(即刚度、质量和单元载荷变回初始值),并被包含在整个温度场的求解域内,以此等效熔覆粉末的逐点添加;空气对流边界条件则由基板上表面移至熔覆层表面,上述温度场求解域的逐渐扩大和边界条件的改变均由 APDL 语言的循环语句实现。另外,不同于垫板区域,为提高计算精度,利用六面体八节点三维实体单元 SOLID70,对熔覆层、基板等温度场重点分析区域采取了较细的自由网格划分,即熔覆层网格尺寸为 0.375 mm×0.3 mm×0.25 mm,熔覆层附近基板热影响区网格尺寸为 0.375 mm×0.2 mm×0.25 mm,基板网格尺寸为 1.25 mm×2.5 mm×2.25 mm,最终模型网格的划分结果可参阅文献^[17-18]。

3 分析与讨论

3.1 温度场特征分析

图 1 给出了该模型在激光熔覆时间为 7.5 s(总熔覆时长 15 s 的一半)时的温度场分布云图。316L 不锈钢粉末和 45 钢基板的液相线温度分别为 1434 °C 和 1510 °C, 据此可将图 1 中红色区域近似表征为熔池。该熔池的直径稍小于激光光斑(4 mm), 其贯穿熔覆层至基板上表面, 实现了熔覆粉末与基体的冶金结合。取 x - z 平面与熔覆层上表面、基板上表面、基板下表面交线的端点为分析点(A1~A6), 各点均落于模型在宽边方向的几何对称面上。

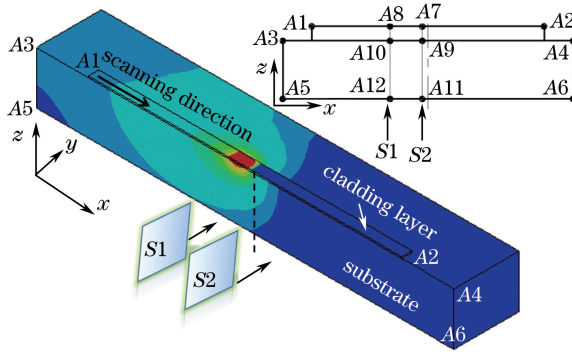


图 1 熔覆时间为 7.5 s 时熔覆零件的温度场及关键点分布

Fig. 1 Distributions of temperature field and key points of cladding part when cladding time is 7.5 s

图 2 所示为 7.5 s 时路径 A1-A2、A3-A4、A5-A6 上的温度及温度梯度分布, 此时激光束移至基板中心位置, 即 x 方向 40 mm 处。已知熔覆层长度为 60 mm, 故 A1-A2 路径位于 x 方向 10~70 mm 范围内, 其温度曲线在 38 mm 处出现峰值温度 2264.5 °C, 表明熔池温度最高点并不位于光斑中心, 而是滞后约半个光斑距离, 这是由于光斑后侧长时间受激光热辐射所致。另外, 该曲线在波峰两侧呈非对称分布, 这主要是因为前端(A1 侧)刚经历激光辐射而具有一定的加热温度, 中部附近区域直接承受激光热载荷而出现温度“脉冲”, 熔覆层材料迅速熔化, 形成熔池, 而末端(A2 侧)熔覆材料在同步送粉方式下尚未参与整个物理域的传热, 保持初始环境温度为 20 °C。由于熔覆层相对较薄(0.3 mm), 基板上表面的温度分布特征与此类似, 路径 A3-A4 在 37.6 mm 处出现峰值温度 1632.2 °C, 稍滞后于熔覆层, 不同之处在于基板熔池部位的热量可横向传递, 故其未熔覆区域的温度曲线较为平滑。

由图 2(b)可知, 熔覆层上表面(A1-A2)分别在 36 mm 和 40 mm 处取得了 x 向温度梯度极值, 其负值域与激光光斑范围重合, 且负极值出现在光斑中心位置处, 表明该处的温度变化最为剧烈。离熔池越远, 熔覆层的温度梯度越平缓, 温差变化越小, 即温度趋于一致。基板上表面的温度梯度分布呈现相同规律, 但正、负极值出现位置的相对距离变窄, 表现为基板的熔池直径较熔覆层的小。另外, 基板下表面 A5-A6 的温度及温度梯度曲线平缓, 不具有脉冲特征。

图 3 所示为基板上、下表面路径 A3-A4、A5-A6 在不同熔覆时刻(3, 6, 9, 12, 15 s)的温度分布。从

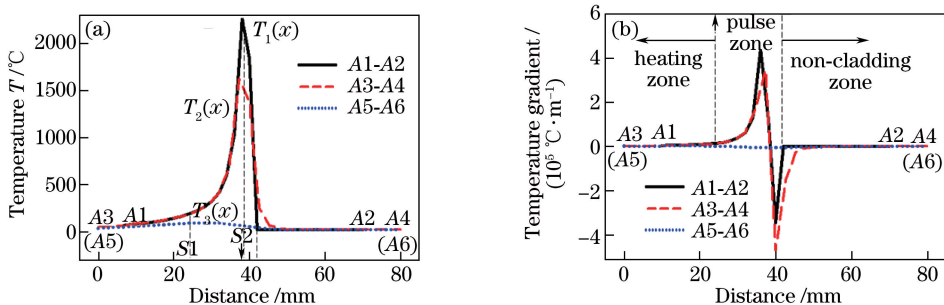


图 2 熔覆时间为 7.5 s 时关键路径上的(a)温度及(b)温度梯度分布

Fig. 2 Distributions of (a) temperature and (b) temperature gradient on critical path when cladding time is 7.5 s

图 3(a)可以看出,基板上表面各点在激光熔覆过程中会依次经历一个剧烈升温过程,温度曲线的峰值及脉冲区宽度稳定,该区间内温度发生突变是激光束的直接热辐射所致。从图 3(b)可以看出,随着熔覆时间的增加,基板下表面的热影响区范围逐渐扩大,峰值温度逐渐升高。单道熔覆结束时(15 s),热影响区宽度几乎扩大为整个基板的横向尺寸,其温度峰值位于 x 向 56 mm 处,与光斑中心相差约一个光斑距离。由于热量向下传导需要时间,基板下表面的温度峰表现出滞后性。与基板上表面脉冲区的机理不同,基板下表面出现热影响区的原因热量传导并逐渐累积。基于激光束能量的高斯分布规律,可以预测基板在垂直于激光扫描方向(y 向)上也具有相似的温度特征。

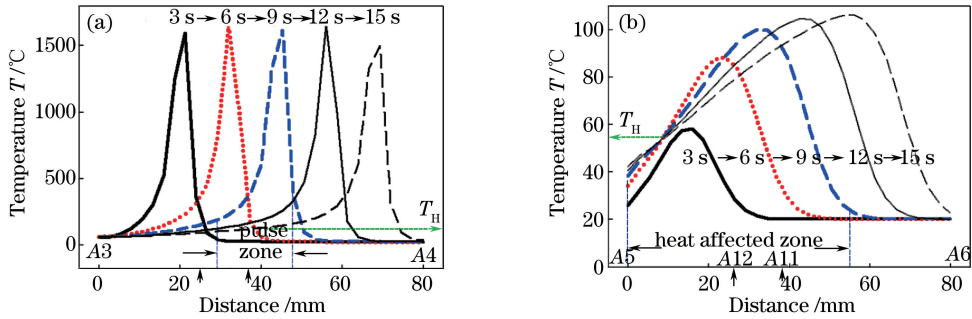


图 3 关键路径(a) A3-A4 和(b) A5-A6 上的温度分布曲线

Fig. 3 Temperature distribution curves on critical paths of (a) A3-A4 and (b) A5-A6

在图 3(a)和图 3(b)任意横坐标处画竖直线与温度曲线相交,基板上表面(A3-A4)各点随时间的温度变化规律均可描述为

$$T_0 \xrightarrow{\nearrow} T_{\max} \xrightarrow{\searrow} T_H \xrightarrow[\text{time} \rightarrow \infty]{\searrow} T_0, \quad (1)$$

式中 T_0 为初始环境温度, T_{\max} 为温度“脉冲”峰值, T_H 为基板整体的加热温度。温变曲线特征可视为“脉冲”峰($\nearrow T_{\max}$)和基板整体升温($\nearrow T_H$)过程的叠加。基板下表面(A5-A6)各点温度也呈现向 T_H 转变的趋势,差别在于中间过程的峰值温度 $T_{\max}(x)$ 会随物理域坐标改变。需要指出,在基板上表面受热升温、冷却降温至 T_H 后,温度还会随冷却时间($t \rightarrow \infty$)缓慢降回至室温 T_0 , 本实验不对该部分时间域的情况进行讨论。

3.2 截面体翘曲变形分析

图 2 中 7.5 s 时路径 A1-A2 上的温度分布曲线可依次分为加热区、脉冲区、未熔覆区,且这三个区域随熔覆时间的增加沿激光束移动方向平移,直至未熔覆区域在熔覆结束时刻消失。由图 3 可知,路径 A3-A4 的温度分布特征与路径 A1-A2 的类似。由于温度相差极大,可将温度梯度出现明显突变的两个拐点位置(24 mm、42 mm)选为上述三个区域的分界点,如图 2 所示。另外,同时刻该温度曲线的峰值出现在 38 mm 处。在图 1 中 24 mm、38 mm 处,分别用 x 向几何平面 S1、S2 截取该物理模型,获得宽度为 14 mm 的截面体,如图 4(a)所示。将 S2、S1 平面分别与路径 A1-A2、A3-A4、A5-A6 的交点记为 A7~A12,可知 7.5 s 时该截面体熔覆层的

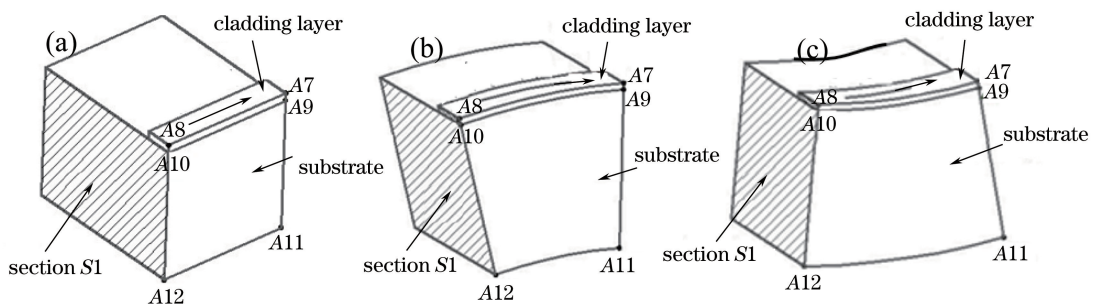


图 4 不同阶段的截面体模型示意图。(a) 变形过程;(b) A7 点升温阶段;(c) A7 点降温阶段

Fig. 4 Schematics of section body model at different stages. (a) Deformation process;

(b) temperature rise stage of A7; (c) temperature drop stage of A7

最高温度落于 A7 点,加热区和脉冲区的边界落于 A8 点;由于路径 A1-A2、A3-A4 的温度特征区间的位置差别不大,近似认为 A9 和 A10 分别为基板上表面的峰值温度点和区间分界点。图 5 所示为截面体 A7~A12 各点的瞬态温度变化情况,可以看到,截面体的分析点 A7 自 6.7 s 后开始迅速升温,7.5 s 时刻达到峰值温度 T_{\max}^{A7} ,随后进入冷却降温阶段,并在 15 s 时趋近于基板整体加热温度 T_H 。

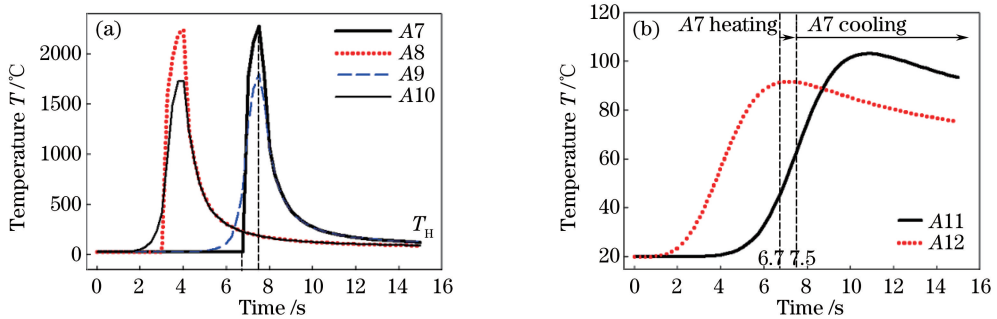


图 5 模型各个关键点的瞬态温度变化曲线。(a) A7~A10;(b) A11 和 A12

Fig. 5 Transient temperature change curves of key points of model. (a) A7-A10; (b) A11 and A12

7.5 s 时,截面体的熔覆层与脉冲区左侧完全重合,A7 点域膨胀最为剧烈,A8 点域已降至较低温度,则 A8 点左侧的加热区会对截面体熔覆层的体积膨胀产生抑制作用,使其承受压应力。碳钢的屈服强度随温度的升高而减小,在 700~800 °C 条件下已接近于 0,碳钢进入全塑性状态。在 A8 点左侧加热区的约束作用下,处于较高温度状态的脉冲区产生较大的压缩塑性变形,熔覆层上表面出现材料的少量堆积。A7 点域的总应变可表示为

$$\epsilon_1 = \lambda_1 (T_{\max}^{A7} - T_0) - \epsilon_{p1} + \epsilon_{e1}, \quad (2)$$

式中 λ_1 为熔覆层材料的热膨胀系数; T_{\max}^{A7} 为 A7 点的峰值温度; ϵ_{p1} 为熔覆层上表面的压缩塑性应变; ϵ_{e1} 为熔覆层受热发生反向弯曲而引起的弹性拉伸应变,冷却后该弹性应变被释放。

据图 2(a) 的温度曲线可得路径 A7-A8 的温度分布函数 $T_1(x)$,则截面体熔覆层上表面在不受任何外界约束下的自由膨胀量可估算为

$$\Delta l_0 = \int_{A8}^{A7} [T_1(x) - T_0] \lambda_1 dx. \quad (3)$$

与 A7 点的应力、应变状态相似,截面体基板上表面分析点 A9 也会在升温膨胀时受到加热区边界 A10 点域的约束,但由于路径 A9-A10 的温度分布函数 $T_2(x)$ 明显低于 $T_1(x)$,故热膨胀量 Δl_2 减小,同时材料的屈服强度增加,基板上表面的压缩塑性变形也相对减少。A9 点域的总应变可表示为

$$\epsilon_2 = \lambda_{12} (T_{\max}^{A9} - T_0) - \epsilon_{p2} + \epsilon_{e2}, \quad (4)$$

式中 T_{\max}^{A9} 为 A9 点的峰值温度; ϵ_{p2} 为基板上表面的压缩塑性应变; ϵ_{e2} 为基板上表面受热发生反向弯曲而引起的弹性拉伸应变,冷却后该弹性应变被释放;基板上表面与熔覆材料实现了冶金结合, λ_{12} 为其所形成的混合物的热膨胀系数。

对比图 2 的 T_1 、 T_3 曲线,截面体基板下表面 A11 点处于相对较低的温度状态,而此时 A12 点处于其最高温度 T_{\max}^{A12} ,整体而言,截面体基板下表面会因左侧区域的热膨胀承受压应力。不考虑热膨胀引起的应变,A11 点域的总应变可表示为

$$\epsilon_3 = -\epsilon_{p3} - \epsilon_{e3}, \quad (5)$$

式中 ϵ_{p3} 为截面体下表面因 A12 点域膨胀而产生的压缩应变; ϵ_{e3} 为基板下表面因受热发生反向弯曲而引起的弹性压缩应变,冷却后该弹性应变被释放。

因此,图 4(a) 中截面体在其分析点 A7 升温结束时刻(7.5 s),熔覆层上表面(A7)和基板上(A9)、下(A11)表面的应变 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 满足

$$\begin{cases} \epsilon_1 > 0 > \epsilon_3 \\ \epsilon_2 > 0 > \epsilon_3 \end{cases}, \quad (6)$$

式中 ϵ_1 、 ϵ_2 的相对大小应根据材料热膨胀系数、温度分布等工艺参数进行判断。从图 4(b)可以看出,截面体的应变模型表现为背离激光束的反向弯曲变形。

7.5 s 以后,分析点 A7 进入冷却降温阶段,A7 点附近区域的体积迅速收缩。图 2 熔覆层上表面(A1-A2)温度分布曲线的脉冲区逐渐移出该截面体位置,进入加热区。15 s 时 A7 点温度趋近于基板整体加热温度 T_H ,其总应变可表示为

$$\begin{aligned} \epsilon_1 = & \lambda_1 (T_{\max}^{A7} - T_0) - \epsilon_{P1} + \epsilon_{e1} + \lambda_1 (T_H - T_{\max}^{A7}) - \epsilon_{e1'} + \epsilon_{P1'} - \epsilon_{e1} = \\ & \lambda_1 (T_H - T_0) - \epsilon_{P1} + \epsilon_{P1'} - \epsilon_{e1'}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\epsilon_{P1'}$ 为熔覆层冷却收缩引起的拉应变, $\epsilon_{e1'}$ 为熔覆层正向弯曲引起的弹性压应变。

截面体 A9 点在相同时间域内也发生降温收缩过程,其总应变表示为

$$\begin{aligned} \epsilon_2 = & \lambda_{12} (T_{\max}^{A9} - T_0) - \epsilon_{P2} + \epsilon_{e2} + \lambda_{12} (T_H - T_{\max}^{A9}) - \epsilon_{e2'} + \epsilon_{P2'} - \epsilon_{e2} = \\ & \lambda_{12} (T_H - T_0) - \epsilon_{P2} + \epsilon_{P2'} - \epsilon_{e2'}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\epsilon_{P2'}$ 为基板上表面冷却收缩引起的拉应变, $\epsilon_{e2'}$ 为基板上表面正向弯曲引起的弹性压应变。

据图 5(b)可知,截面体 A11 点域 7.5 s 后仍继续升温,10.2 s 时温度达到峰值 T_{\max}^{A11} ,基板下表面体积膨胀量 ΔV_3 增大至最大值,随后进入缓慢降温阶段。15 s 时刻 A11 点域的总应变可近似表示为

$$\epsilon_3 \approx \lambda_2 (T_{\max}^{A11} - T_0) - \epsilon_{P3'} + \epsilon_{e3'}, \quad (9)$$

式中 $\epsilon_{P3'}$ 为基板下表面 A11 点域因热膨胀且受到 A12 点域约束而产生的压应变; $\epsilon_{e3'}$ 为基板受热发生正向弯曲而引起的下表面弹性拉伸应变,继续冷却后该弹性应变会被释放。据图 3(b)中 A11-A12 区间在 15 s 时刻的温度分布,两点域温差较小,故约束应变 $\epsilon_{P3'}$ 取相对较小值。则图 4(b)所示反向弯曲截面体在激光熔覆结束时刻(15 s),熔覆层上表面(A7)和基板上(A9)、下(A11)表面的总应变 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 满足

$$\begin{cases} \epsilon_1 < 0 < \epsilon_3 \\ \epsilon_2 < 0 < \epsilon_3 \end{cases} \quad (10)$$

截面体模型转变为图 4(c)所示的应变状态,呈朝向激光束的正向弯曲变形。

该截面体沿激光束扫描方向的应变可归纳为 6.7~7.5 s 的反向弯曲变形和随后的 7.5~15 s 的正向翘曲变形,这与激光弯曲加工温度梯度机理所描述的板材变形^[9]有相似之处。由于截面体是依据某一时刻熔覆层表面温度分布曲线的峰值点以及脉冲区-加热区的分界点截取图 1 所示的物理模型所获得的,其物理域会紧随激光束向熔覆终点移动,因此熔覆基板在宏观上表现出朝向激光束翘曲变形的特征^[4]。图 3(b)中分析路径 A5-A6 上的热影响区逐渐扩大,峰值温度升高,因此基板下表面热影响区内任何一点的热膨胀受到的周围区域约束限制的作用会越来越弱,可以预测激光熔覆终点位置处的截面体发生正向弯曲的变形程度最大。

4 结 论

针对单层单道方式的激光熔覆物理过程,利用已验证的数学模型,在 ANSYS 软件上求解其温度场,归纳其温度场特征,进一步对熔覆基板沿激光扫描方向上的翘曲变形问题展开了理论分析,得到如下结论。

1) 在激光熔覆过程中,基板上表面沿激光束扫描方向的温度分布可依次划分为加热区、脉冲区、未熔覆区,基板下表面存在热影响区。随着熔覆时间的增加,脉冲区的宽度和峰值温度均保持稳定,热影响区范围则逐渐扩大。二者的形成机理不同,脉冲区的急剧温变由移动激光束的短暂热辐射引起,而热影响区的温变由热传导及基体热量逐渐累积所致。

2) 依据任意时刻熔覆层表面温度曲线的温度峰值点和加热区-脉冲区的分界点,分别以无限大平面截取单道熔覆物理模型,可获得用于翘曲变形分析的截面体。

3) 熔覆层的温变历程可分解为由室温升至峰值温度和由峰值温度降至基板整体加热温度两个阶段,相应的截面体模型依次出现反向(背离激光束)、正向(朝向激光束)弯曲变形。单道激光熔覆模型最终呈朝向激光束的翘曲变形特征。

4) 单道激光熔覆基板翘曲变形的原因较为复杂,主要有:熔覆层和基板材料的热膨胀系数不一致;基板

上下表面存在较大温差,材料的热膨胀和冷收缩过程不一致;基板上表面脉冲区和下表面热影响区的形成机理及宽度范围不同,受周围稳定区域变形约束的程度也不同。

参 考 文 献

- [1] Dubourg L, Archambeault J. Technological and scientific landscape of laser cladding process in 2007[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(24): 5863-5869.
- [2] Muwala G, Karmakar D P, Nath A K. Online monitoring of thermo-cycles and its correlation with microstructure in laser cladding of nickel based super alloy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 139-152.
- [3] Yi P, Liu Y C, Fan C F, *et al.* Impact analysis of the thermal mechanical coupling characteristics of graphite morphologies during laser cladding of gray cast iron[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 52-64.
- [4] Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, *et al.* Laser solid forming[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 260-262.
黄卫东, 林鑫, 陈静, 等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 260-262.
- [5] Yang Jian. Research on mechanical behavior of laser rapid forming metal part[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004: 45.
杨健. 激光快速成形金属零件力学行为研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004: 45.
- [6] Zhang Kai, Liu Tingting, Zhang Changdong, *et al.* Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0903007.
张凯, 刘婷婷, 张长东, 等. 基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903007.
- [7] Luo Mingxian. Numerical simulation of thermal-mechanical behavior during laser cladding 316L stainless steel powder [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 73-74.
罗明贤. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺热-力耦合数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011: 73-74.
- [8] Krzyzanowski M, Bajda S, Liu Y J, *et al.* 3D analysis of thermal and stress evolution during laser cladding of bioactive glass coatings[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 59: 404-417.
- [9] Su Yupeng, Wang Xiufeng, Chen Guangnan, *et al.* Remark on laser bending mechanisms[J]. *Material Science and Technology*, 2004, 12(5): 543-545.
苏余鹏, 王秀凤, 陈光南, 等. 激光弯曲机理的评述[J]. *材料科学与工艺*, 2004, 12(5): 543-545.
- [10] Wang Wei, Wang Xingliang, Tong Ming, *et al.* Warping distortion defect of selective laser sintering rapid prototyping work pieces[J]. *Foundry Technology*, 2010, 4: 507-510.
王维, 王兴良, 佟明, 等. 选择性激光烧结快速成形制件翘曲变形的研究[J]. *铸造技术*, 2010, 4: 507-510.
- [11] Deng Shishi, Yang Yongqiang, Li Yang, *et al.* Planning of area-partition scanning path and its effect on residual stress of SLM molding parts[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1202003.
邓诗诗, 杨永强, 李阳, 等. 分区扫描路径规划及其对 SLM 成型件残余应力分布的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202003.
- [12] Dai Deping, Jiang Xiaohua, Cai Jianpeng, *et al.* Numerical simulation of temperature field and stress distribution in Inconel718 Ni base alloy induced by laser cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0903005.
戴德平, 蒋小华, 蔡建鹏, 等. 激光熔覆 Inconel718 镍基合金温度场与应力场模拟[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903005.
- [13] Fang Jinxiang, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.* Study of stresses of laser metal deposition using FEM considering phase transformation effects[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0503009.
方金祥, 董世运, 徐滨士, 等. 考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0503009.
- [14] Shi Likai, Gao Shiyu, Xi Mingzhe, *et al.* Finite element simulation for laser direct depositing processes of metallic vertical thin wall parts I. The simulation for temperature field during depositing processes [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(5): 449-453.
石力开, 高士友, 席明哲, 等. 金属直薄壁件激光直接沉积过程的有限元模拟 I. 沉积过程中温度场的模拟[J]. *金属学报*, 2006, 42(5): 449-453.

- [15] Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Shi Likai, *et al.* Numerical simulation of 3D transient temperature field in thin-wall metal parts fabricated by laser direct deposition[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous metals*, 2003, 13(4): 887-892. 席明哲, 张永忠, 石力开, 等. 激光快速成形金属薄壁零件的三维瞬态温度场数值模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(4): 887-892.
- [16] Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Gao Shiyu, *et al.* Calculation of transient temperature field of thin-walled parts during the process of laser direct forming[C]. *Beijing: China Materials Seminar in 2004*, 2004: 474. 席明哲, 张永忠, 高士友, 等. 激光直接成形中薄壁零件瞬态温度场计算[C]. *北京: 2004 中国材料研讨会*, 2004: 474.
- [17] Gong Xinyong, Luo Jianguo, Gao Shiyu, *et al.* Numerical simulation of temperature field in laser cladding for different overlap rate[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2015, 6: 83-88. 宫新勇, 罗建国, 高士友, 等. 基于不同搭接率的激光熔覆温度场数值模拟研究[J]. *华北科技学院学报*, 2015, 6: 83-88.
- [18] Gong Xinyong, You Wei, Gao Shiyu, *et al.* Numerical simulation of temperature field in laser cladding for different scanning path[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2016, 5: 48-54. 宫新勇, 由伟, 高士友, 等. 基于不同扫描路径的激光熔覆温度场数值模拟研究[J]. *华北科技学院学报*, 2016, 5: 48-54.