

用欧拉法对薄壁件激光直接成形建模

张永杰, 虞 钢, 何秀丽, 宁伟健, 郑彩云

(中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 采用欧拉方法建立了激光直接成形薄壁件的二维传热模型。分离模型中的参数和变量并对模型进行了无量纲化, 对最终无量纲化模型中的 6 个无量纲参数进行了分析讨论。研究表明: 针对此二维传热模型的无量纲化减少了参数, 简化分析过程; 在激光直接成形过程中, 实际层高和光束移动速度的乘积共同对温度场起作用, 而非单独影响温度场。

关键词: 激光技术; 激光直接成形; 欧拉方法; 传热模型; 无量纲化

中图分类号: TG156; O303 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2011)07-0092-04

Mathematical modeling of laser direct metal forming of thin wall by Eulerian method

ZHANG Yong-jie, YU Gang, HE Xiu-li, NING Wei-jian, ZHENG Cai-yun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A two-dimensional mathematical model based on Eulerian method was developed to describe the laser direct metal forming of a thin wall. The mathematical model describing the time-varying system was nondimensionalized. The results show that the mathematical model can simplify the analysis and reduce the number of parameters. In the laser direct metal forming process, the product of layer increment and laser travel speed contributes to the evolution of temperature distribution.

Key words: laser technique; laser direct metal forming; Eulerian method; heat transfer modeling; nondimensionalization

激光直接成形是基于离散堆积原理和激光熔覆技术而发展起来的一种先进制造技术, 在航空航天等高新技术领域中具有重要的发展应用前景^[1]。它能够实现结构复杂、高性能金属零件的无模具快速成形以及对微观组织结构和性能的柔性控制。但是由于激光直接成形过程复杂, 工艺参数众多, 整个添加制造过程中基板和堆积材料组成的系统的质量和边界都是随时间变化的, 因而整个时变系统的温度场演化比较复杂, 温度梯度很高。而影响最终零件力学性能(热致残余应力、微观组织结构等)和几何精度最主要的一个因素就是材料经受的温度历程。

目前对激光直接成形过程中物理机制的一个重要研究方法是建立模型并进行数值求解。由于激光直接成形薄壁件过程比较典型, 因此目前针对激光直接成形薄壁件过程中的温度场建模已经开展了较多的研究。这些模型主要分两类: 第一类模型假设成形薄壁到某一高度后温度比较均匀, 将研究对象设定为具有均匀初始温度的固定体积的体, 研究激光扫描上表面过程中的温度场^[2]、流场^[3]等演化规

律。这类模型主要以二维模型为主, 二维模型计算简单, 用时少, 尤其在需要实时计算预测并反馈温度场的系统中很有优势。但这种模型只能计算单层熔覆过程, 不能体现激光直接成形过程中材料的质量和边界的时变过程, 而且初始温度的确定比较困难, 不能研究整个成形过程中的温度场演化过程。第二类是使用商业软件中的生死单元技术模拟成形过程的质量、边界变化过程^[4-9], 即先建立整个成形后的几何模型并划分网格, 在开始计算前, 将未成形部分的单元刚度矩阵设为零, 使其不对温度场产生影响, 计算过程中逐层激活单元, 使其正常参与计算, 从而模拟材料的堆积过程。这种方法能较为准确的预测温度场演化。但由于依赖商业软件, 使用的是数值技巧, 而且计算量大, 求解时间长。

本文的研究目的是建立激光直接成形薄壁件过程的完整数学描述, 在建立基于欧拉方法的激光直接成形的二维传热模型的基础上, 对模型进行了无量纲化, 整合了工艺参数, 并对最终无量纲化模型中的各个无量纲参数进行了分析。

1 欧拉方法建模

1.1 物理过程描述及分析

激光直接成形薄壁件过程开始时, 激光束作用在基板上产生熔池, 载粉气将金属粉末通过送粉头不断

收稿日期: 2011-03-28

作者简介: 张永杰(1983—), 男, 甘肃庆阳人, 博士研究生, 主要从事激光直接成形方面的研究。联系电话: 010-82544251, E-mail: zyojie@126.com。通讯作者: 虞 钢, 博士生导师, 联系电话: 010-82544250, E-mail: gyu@imech.ac.cn

添加到熔池中,同时激光束和送粉头由计算机控制沿水平 x 方向以扫描速度 V 移动,从位置 $x = -l_x/2$ 移动到 $x = l_x/2$ 处形成一层,然后激光束和送粉头在垂直方向上升层高 h_c 后从 $x = l_x/2$ 移动到 $x = -l_x/2$,从而又堆积一层,如此往复堆积,成形出薄壁件,过程如图 1 所示。在此过程中,激光永远加载在薄壁的上沿,薄壁中热流方向主要为沿薄壁向下,因此可在 xz 平面内建立二维模型。

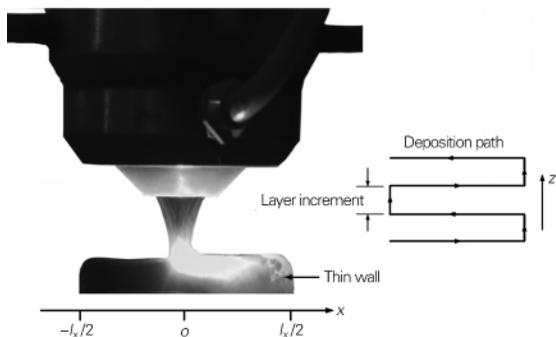


图 1 激光直接成形薄壁过程

Fig. 1 Laser direct metal forming of thin wall

1.2 基本假设

为建立激光直接成形薄壁件过程的二维数学模型,做如下基本假设:① 假设在整个成形过程中,工件的几何形状变化仅为高度方向上匀速增长。由于成形过程中的层高(一般在 0.1 ~ 1 mm)远小于基板与成形薄壁的特征尺度,因此假设合理。② 假设激光光束功率密度为高斯分布:

$$q(r) = \frac{2Q}{\pi \times r_b^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right) = q_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right) \quad (1)$$

其中 Q 为激光功率,单位 W, r_b 为光斑半径, $q_0 = \frac{2Q}{\pi \times r_b^2}$ 。③ 材料的密度、比热、热传导系数等热物性参数为常数。④ 材料各向同性,不考虑熔池内液态金属的表面张力、对流等。

1.3 控制方程

建立一个二维求解域,此域的宽度即为成形薄板的长度 l_x ,域的上沿始终为成形过程中薄壁的上沿,可以认为在求解域内材料匀速向下运动,如图 2 所示。由假设①可知工件的几何形状变化为高度方向上匀速增长,增长层高 h_c 所用时间为 l_x/V ,因此求解域内材料向下运动速度

$$w = \frac{h_c V}{l_x} \quad (2)$$

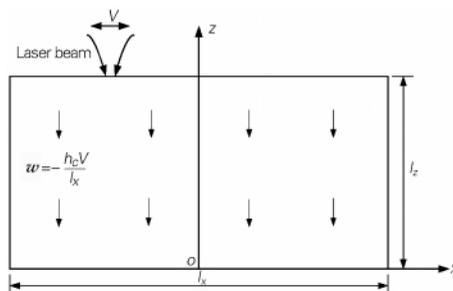


图 2 求解域示意图

Fig. 2 Scheme of calculation domain

在整个成形过程中主要关注此求解域内材料的温度场演化过程。采用欧拉描述,几何点 (x, y, z) 上 t 时刻温度的欧拉描述为 $T(x, y, z, t)$ 。此瞬态热传导过程的控制方程为:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial(wT)}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

1.4 初始和边界条件

激光直接成形薄壁件过程中,加载在薄壁件上表面的激光在 x 方向往复运动,周期为 $2l_x/V$ 。由傅里叶级数可知,任何周期函数都可以用正弦函数和余弦函数构成的无穷级数来表示。为了使用方程对此周期性热载荷进行描述,这里使用一阶正弦函数来描述激光束的运动。在此二维模型中,激光光斑中心位移 x 随时间 t 的变化可以表示为 $x(t) = \frac{l_x}{2} \sin\left(\frac{\pi V}{l_x} t - \frac{\pi}{2}\right)$ 。此正弦函数描述的位移随时间变化与实际位移变化曲线比较如图 3 所示。

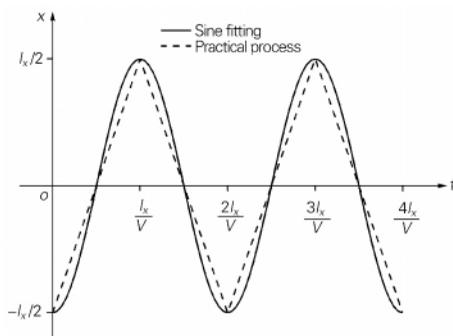


图 3 正弦函数与实际位移变化曲线比较

Fig. 3 Comparison between sine fitting and practical displacement changing curves

则上表面边界条件为:

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha q_0 \exp\left\{ -\frac{2 \left[x - \frac{l_x}{2} \sin\left(\frac{\pi V}{l_x} t - \frac{\pi}{2}\right) \right]^2}{r_b^2} \right\} - h(T - T_0) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (4)$$

在实际激光直接成形过程中,为了便于工艺控制,基板一般放置在绝热材料或者大体积导热材料上,则基板下表面边界条件分别对应于绝热边界条件(第二类边界条件)或者恒定温度边界条件(第一类边界条件)。本模型中认为基板下表面绝热,采用第二类边界条件。

基板下表面($z = 0$):

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

求解域左右表面通过对流和热辐射与环境传递热量:

左表面($x = -\frac{l_x}{2}$):

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

右表面($x = \frac{l_x}{2}$):

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (7)$$

初始时刻材料的温度为环境温度,则初始条件为:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (8)$$

2 模型的无量纲化及参数分析

量纲分析是自然科学中的一个重要研究方法,对描述物理过程的模型进行无量纲化可以简化方程,减少参数,明晰物理意义。对以上激光直接成形薄壁件二维数学模型进行无量纲化,包括对控制方程和边界及初始条件的无量纲化。

首先确定模型中的参数和变量,在此模型中,共有11个参数和4个变量。参数可以分为几何参数,材料参数,工艺参数3类。几何参数包括 l_x, l_z ,材料参数包括 $\rho, c, k, \varepsilon\sigma$,工艺参数包括 $\alpha q_0, V_0, r_b, h, T_0$ 。4个变量可分为3个自变量(x, z, t)和1个因变量 T 。

然后使用合适的参数来度量变量,选择度量变量的参数的原则是两者数量级尽量接近。得到无量纲化的变量如下:

$$x^* = \frac{x}{l_x}, z^* = \frac{z}{l_z}, t^* = \frac{t \cdot w}{l_z}, T^* = \frac{T}{T_0}$$

$$\text{即 } x = x^* \cdot l_x, z = z^* \cdot l_z, t = t^* \cdot \frac{l_z}{w}, T = T^* \cdot T_0$$

将上式代入控制方程和边界以及初始条件,得

$$\Pi_1 \left(\frac{\partial T^*}{\partial t^*} - \frac{\partial T^*}{\partial z^{*2}} \right) = \left(\Pi_2^2 \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} \right)$$

$$\text{其中, } \Pi_1 = \frac{\rho c_p w l_z}{k}, \Pi_2 = \frac{l_z}{l_x}$$

上表面($z^* = 1$):

$$\frac{\partial T^*}{\partial z^*} = \Pi_3 \exp \left\{ -2 \frac{\left[x^* - \frac{1}{2} \sin \left(\frac{\pi l_z t^*}{h c} - \frac{\pi}{2} \right) \right]^2}{\Pi_4^2} \right\} - \Pi_3 Nu (T^* - 1) - \Pi_2 \Pi_5 (T^{*4} - 1);$$

下表面($z^* = 0$): $\frac{\partial T^*}{\partial z^*} = 0$

左表面($x^* = -\frac{1}{2}$):

$$\frac{\partial T^*}{\partial x^*} = Nu (T^* - 1) + \Pi_5 (T^{*4} - 1)$$

右表面($x^* = \frac{1}{2}$):

$$- \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = Nu (T^* - 1) + \Pi_5 (T^{*4} - 1)$$

$$T^* (x^*, z^*, 0) = 1$$

$$\text{其中 } \Pi_3 = \frac{\alpha q_0 l_z}{k T_0}, \Pi_4 = \frac{r_b}{l_x}, \Pi_5 = \frac{l_z \varepsilon \sigma T_0^3}{k}, \Pi_6 = \frac{h l_x}{k}$$

无量纲化后的模型中一共只有6个无量纲参数,他们分别为 $\Pi_1 \sim \Pi_6$ 。对这6个无量纲数分别进行分析。

Π_1 是传热学中经典的Peclet数(Pe)表征的是对流传热与热传导传热的比值。由于单位宽度上单位时间内有效送粉质量 $\dot{m} = \rho V h_c$,代入到 Π_1 中得:

$$\Pi_1 = Pe = \frac{\rho c_p V h_c l_z}{k l_x} = \frac{\dot{m} c_p l_z}{k l_x}$$

可以看出,在激光直接成形过程中,光束移动速度并不是一个独立的影响因素,它与层高的乘积作为一个影响因素共同出现。而这两个量与送粉率直接相关,因此送粉率对热量在薄壁中的传导有重要影响。

Π_2 是表征几何参数的无量纲数,表征选取区域的特征高度和特征长度的比值。 Π_3 是输入能量与材料热传导热量的比值,数值越大,表明薄壁和已堆积材料组成的系统吸收的热量越多。 Π_4 是光斑半径与特征长度的比值,它很大程度上决定了最终成形材料的厚度,也表征了能量的分布范围。 Π_5 是材料表面辐射传热和材料内部热传导之间的比值。 Π_6 是传热学中的Nusselt数(Nu),表征的是边界对流换热与导热之比。可以看出,这6个无量纲数可以分3类:①表征能量输入的,用 Π_3, Π_4 表征;②热在工件内的传播,用 Pe, Π_2 表征;③外在边界传热条件,用 Nu 和 Π_5 表征。

3 数值计算与验证

对前面所述温度场控制方程并结合边界条件及初始条件进行数值求解,就能够得到激光直接成形薄壁

件过程中的温度场演化过程。进行数值计算时,首先按照图 2 所示的求解域建立几何模型,并划分网格,为获得足够高的计算精度,同时避免过多网格引起计算时间过长,在激光辐射区及邻近区域使用较密网格,而在远离激光辐射区使用较粗网格。最后进行温度场的数值求解。模型中的网格及计算得到的温度场分布如图 4 所示。

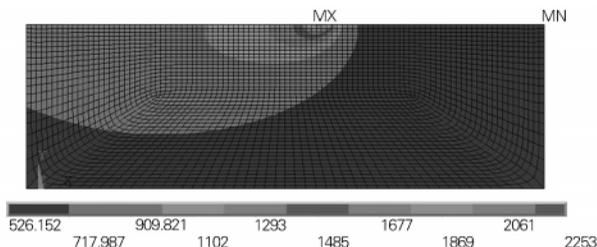


图 4 数值计算温度场分布
Fig. 4 Calculated temperature distribution

为了验证本文所建模型的计算结果,通过铠装热电偶测量得到激光直接成形 316 不锈钢薄壁件过程中激光轨迹中点下方距离基板上表面 2 mm 位置的温度历程。主要材料参数和试验工艺参数:密度 8000 kg/m^3 ,导热系数 $21.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,比热 $500 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$,发射率 0.62,对流传热系数 $100 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$,激光功率 500 W,光束移动速度 2.5 mm/s,光斑半径 1.5 mm。求解域大小为 $60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。模型计算与试验测量结果比较如图 5 所示,可以看出温度演化趋势与试验测得的结果相符合。由于受外部接触热阻和本身热电偶响应时间的影响,温度试验峰值比计算值略低。

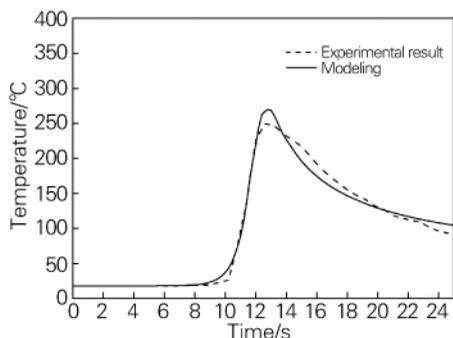


图 5 模型温度的计算值与试验测量值比较
Fig. 5 Comparison between the computed and the corresponding experimental results

本模型基于欧拉描述方法,体现了成形过程中的主要时变特征。同时由于对激光直接成形薄壁件过程进行了一定程度上的简化,如不考虑熔池内液态金属的对流,但实际成形过程中,由于表面张力作用,熔池

内液态金属的对流会使熔池增大,熔池温度梯度减小。因此为使模拟计算更加接近实际情况,下一步工作中将基于欧拉描述方法建立激光直接成形过程更为复杂的传热传质数学模型,从而求解激光直接成形过程中的温度场、流场和压力场等相关信息。

4 结论

1) 使用欧拉方法对激光直接成形薄壁件的时变过程进行了数学建模和数值计算,此模型能够体现成形过程中的主要时变特征。

2) 在激光直接成形薄壁件过程中,层高和光束移动速度的乘积共同影响温度场,而非单独起作用,而这两个量与有效送粉率直接相关。

3) 通过对模型的无量纲化,减少了参数并简化了分析,能够为提高激光直接成形工艺提供依据。

参考文献:

- [1] 张冬云,王瑞泽,赵建哲,等. 激光直接制造金属零件技术的最新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 18-25.
Zhang Dongyun, Wang Ruize, Zhao Jianzhe, et al. Latest advance of laser direct manufacturing of metallic parts [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 18-25.
- [2] Wang L, Felicelli S. Analysis of thermal phenomena in LENS deposition [J]. Mater Sci Eng A, 2006, 435-436(5): 625-631.
- [3] Yin H, Felicelli S, Wang L. Fluid flow, heat and mass transfer in the molten pool of the LENS process [C] // TMS Annual Meeting, New Orleans, LA, United States, 2008: 261-270.
- [4] Peyre P, Aubry P, Fabbro R, et al. Analytical and numerical modelling of the direct metal deposition laser process [J]. J Phys D: Appl Phys, 2008, 41(2): 1-10.
- [5] Costa L, Vilar R, Reti T, et al. Rapid tooling by laser powder deposition: process simulation using finite element analysis [J]. Acta Mater, 2005, 53(14): 3987-3999.
- [6] Wang L, Felicelli S. Process modeling in laser deposition of multilayer SS410 steel [J]. J Manuf Sci and Eng, 2007, 129(6): 1028-1034.
- [7] 贾文鹏,林鑫,陈静,等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1308-1312.
Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing, et al. Temperature/stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(9): 1308-1312.
- [8] Neela V, De A. Three-Dimensional heat transfer analysis of lenst process using finite element method [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2009, 45(9-10): 935-943.
- [9] 马良,黄卫东,于君,等. 金属激光立体成形热应力场参数化有限元模型[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3226-3232.
Ma Liang, Huang Weidong, Yu Jun, et al. Parametric finite element model of temperature/stress field evolution by metal laser solid forming [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3226-3232.