

基于 Gauss 热源模型的 BT20 钛合金管口 激光焊接数值模拟

Numerical Simulation of Laser Welding for BT20 Titanium Alloy Mouthpiece
by Using the Gauss Heat-Source Model

太原科技大学 李世峰 陈素玲

[摘要] 基于热弹塑性有限元方法,建立激光焊接的热力学计算模型,利用三维有限元分析软件 ANSYS, 使用其 APDL 语言,对 BT20 钛合金管接头激光焊接过程中的温度场和应力场有限元模拟问题进行了研究。结合数值计算,讨论了激光焊接过程中采用瞬间空冷后,试件内应力的分布情况。

关键词: 激光焊接 温度场 应力场

[ABSTRACT] Based on the thermal elastic-plastic FEM (Finite Element Method), the thermodynamics model of laser welding has been set up, by three dimensional ANSYS finite software element, with APDL language Supported by ANSYS, FES (Finite Element Simulation) of temperature field, stress field in laser welding of BT20 Titanium Alloy Mouthpiece is studied. Combined with numerical calculation results, after instantaneous air-cooled handing during laser welding, the stress distributed situation of specimen has been analyzed.

Keyword: Laser welding Temperature field Stress field

激光焊接是利用高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密的成形方法,是一个快速而不均匀的热循环过程。激光焊接过程中,热源直径很小,集中作用在激光接头部位,使温度分布不平衡,零件存在较大的温度梯度,从而引起不均匀的热应力场,成为影响成形件结构质量和使用性能的重要因素。另外,激光焊接是一个骤冷骤热的过程,其温度场的分布和变化对于零件尺寸精度、表面质量、组织形态和裂纹等缺陷的形成有着非常重要的影响。

激光焊接中,熔池及熔池附近区域的材料经历了不同的膨胀率和收缩率,导致了复杂的三维残余应力状态,致使零件中产生热应力,若热应力使材料“屈服”,并发生塑性变形,零件的尺寸精度就会受到影

响;若零件的热应力超过材料的抗拉强度,零件就会产生裂纹。并且激光熔池的形成,具有加热时间短、温升快、熔池温度高等特点,当熔池中熔体凝固时,又具有凝固速度快的特点。所以采用试验方法研究激光熔池温度场、热应力场随时间的变化规律,具有许多难以克服的困难。本研究采用 ANSYS 软件,建立激光焊接过程中零件的瞬态温度场有限元模型,用 ANSYS 的 APDL 语言和“生死单元”技术实现激光焊接中热源的移动,并在温度场模拟的基础上,进行了激光焊接应力场的数值模拟,分析了成形过程中内部残余应力的分布情况,得出了激光焊接过程中的温度场、热应力场分布和变化规律。

1 建立温度场数学模型

ANSYS 热分析分为稳态热分析和瞬态热分析。由于激光焊接过程是一个局部快速加热至高温随后骤冷的过程,也是一个快速、复杂、多维、多参数的过程,发生着材料的熔化、气化及熔池金属的快速冷却结晶。随着热源的移动,整个焊件的温度随时间和空间急剧变化,材料的热物理性能也随之剧烈变化。因此,焊接温度场分析属于高度的非线性瞬态分析过程。

根据热力学第一定律,其热流方程为^[1,2]

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = Q, \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度, t 为时间, c 为材料定压比热, T 为瞬间温度, $\{L\}$ 为梯度算子, $\{v\}$ 为流体对流的速度向量, $\{q\}$ 为热流密度向量, Q 为单位体积热产生率。再根据傅立叶定律,热流密度与热梯度关系为:

$$\{q\} = -[D] \{L\}^T \quad (2)$$

式中, $[D]$ 为热传导系数矩阵;

(1)初始条件。

当 $t=0$ 时刻,工件的初始温度为周围环境温度:

$$T = T_0. \quad (3)$$

(2)边界条件。

边界上的热流密度分布:

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = q_s(x, y, z, t), \quad (4)$$

边界上物体与周围介质的热交换:

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = \beta(T_s - T_\alpha), \quad (5)$$

式中, q_s 为单位面积上的外部输入热源, β 为表面换热系数, T_α 为周围介质温度, T_s 为导体表面上的温度; n_x, n_y, n_z 为边界外法线的方向余弦。于是将(1)式改写成矩阵形式:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T (\{D\} \{L\} T) + Q, \quad (6)$$

对于瞬间传热问题, 温度是空间坐标与时间的函数, 即 $T=T(x, y, z, t)$, 因此, 热量方程的离散化包括空间离散与时间离散 2 方面。空间离散为求解区域的离散, 其最有效的方法是有限单元法; 而在时间域内, 则宜用有限差分法进行离散。这样, 将有限单元法与有限差分法有机地结合起来形成混合算法, 充分利用了有限单元法在空间域划分中的优点和有限差分法在时间域中的优点。

温度场离散可表示为:

$$T = \{N\}^T \{T_e\}, \quad (7)$$

式中: T 为单元内温度; $\{N\}$ 为单元形函数; $\{T_e\}$ 为节点温度列向量;

在焊接过程中, 温度场是一个非稳态过程, 温度对时间的积分采用差分方法, 即温度对时间的导数可表示为:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_i - T_{i-\Delta t}}{\Delta t}, \quad (8)$$

式中, Δt 为时间增量;

由(7)式可得:

$$\begin{aligned} \dot{T} &= \frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^T \{\dot{T}_e\}, \\ \delta T &= \{\delta T_e\}^T \{N\}, \\ \{L\} \dot{T} &= \{B\} \{\dot{T}_e\}, \quad \{B\} = \{L\} \{N\}^T, \end{aligned} \quad (9)$$

将(9)式入热流方程(6)式, 写成矩阵形式:

$$[C_e] \{T_e\} + \left([K_e^m] + [K_e^c] + [K_e^b] \right) \{T_e\} = \{Q\}. \quad (10)$$

式中: $[C_e]$ 为比热引入的单元热阻尼矩阵; $\{Q\}$ 为热流密度引起的载荷列向量; $[K_e^m]$ 、 $[K_e^c]$ 、 $[K_e^b]$ 为单元质量传输、单元扩散、热传导矩阵。

2 建立有限元模型

激光焊接时的有效加热直径很小, 在有限元网格划分时, 既要考虑节省计算时间, 又要保证激光焊接处的精度, 所以采用特殊的网格划分形式。远离焊接的区域, 由于温度变化不明显, 应采用比较大的网格尺寸, 有利于节省计算时间; 在焊接位置附近, 温度场变化剧烈, 需要采用较细密的网格划分, 以保证计算的精确性, 焊接处的最小网格尺寸要与激光光斑尺寸相当, 选择 Solid 70 六面体八节点单元类型, 并施加将薄壁零件的底部节点位移限制为零的边界条件。BT20 钛合金油管接头有限元模型如图 1 所示。

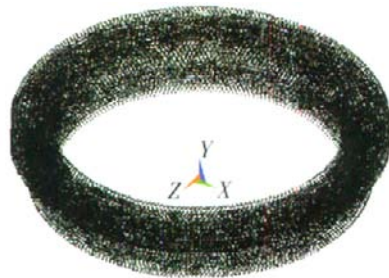


图 1 零件的有限元模型

Fig.1 Finite element model of part

激光焊接过程中, 材料发生熔化、气化及熔池金属的快速冷却结晶, 同时伴随着如热传导、流体流动、相态变化等现象。而能量耦合、吸收、传输机制等是影响深熔小孔焊接过程及质量和焊缝气孔、裂纹等缺陷的关键。模拟这样一个过程非常复杂, 所以, 在模拟中忽略某些不重要的因素, 这样既能保证模拟的计算精度又可大大节约运算资源和时间。所作的假设如下: (1)忽略熔滴对熔池的作用; (2)试件的所有外边界只与空气发生对流换热; (3)热源以恒定速度 V 移动, 表面及小孔热量密度均服从高斯分布; (4)被焊接材料的热物理性能参数与材料内部的空间位置无关。

3 瞬态温度场热源模型

激光焊接过程中, 激光束作为热源, 具有高能、集中、瞬时三大特征。热源特点主要由其工艺特征决定, 即激光光源所产生的瞬时高能密度, 除了使粉末熔化形成熔覆层外, 还会导致金属气化, 这无疑加大了模型建立的难度。此外, 在激光焊接过程中, 成形速度较快, 激光经过熔覆层的前后较短时间内熔覆层和基体表层升温 and 冷却的速率极大, 可使熔覆层和热影响区

上的金属组织发生非稳态相变。所以,在对激光焊接进行数值模拟时,区域热载荷采用高斯函数的热流分布是更切实际的一种热源分布函数,它利用高斯分布的表面热流分布函数和有限元或有限差分法,进一步提高了高温区的准确性。其热源模型如图 2 所示。

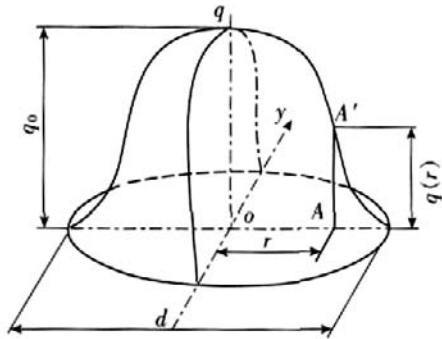


图 2 高斯分布的热流密度
Fig.2 Gaussian distribution of heat flux

其函数表达式为:

$$q_r = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (11)$$

式中, q_m 为加热斑点中心最大热流密度; R 为电弧有效加热半径; r 为点 A 距加热斑点中心的距离。

对于移动热源:

$$q_m = \frac{3r^2}{\pi R^2} Q, \quad (12)$$

其边界条件为:

$$-k \frac{\delta T}{\delta y} = h(T - T_a) \quad -k \frac{\delta T}{\delta x} = h(T - T_a) \quad -k \frac{\delta T}{\delta z} = h(T - T_a) \quad (13)$$

式中,环境温度 $T_a = 20^\circ\text{C}$, h 为空气的自然对流热换系数。

4 模拟结果与分析

4.1 温度场结果分析

温度场的模拟结果是整个模拟过程的基础,温度场的变化情况对工件的应力场分布有着决定性的影响。BT20 钛合金材料的热物理性能和力学性能随温度变化的关系如图 3 所示。图 4 为激光功率 2 000W、扫描速度 $6 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、光斑直径 $2 \times 10^{-3} \text{m}$ 条件下,不同时刻薄壁零件的温度场分布云图。

图 4(a) 为焊接 5s 时的温度云图,此时,在沉积薄壁零件的第 1 层。图 4(b) 为成形 15s 时的温度场云图,与图 4(a) 相比,激光束扫描方向发生了改变,薄壁零件中温度分布发生了明显的变化。图 4(c) 为成形 60s 时,零件中的温度场分布情况。可以看出,随激光束的移动,薄壁零件的温度场分布也呈“运动态”,随激光扫描时间的增加及扫描方向的改变,薄壁零件的温度分布状态发生明改变,零件总升温高。

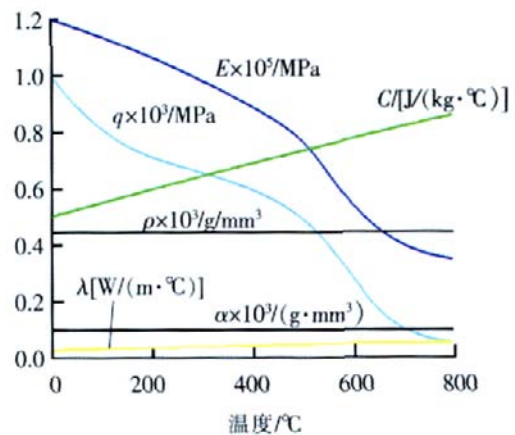


图 3 材料热物理性能及力学性能参数
Fig.3 Thermophysical properties and mechanical property performance

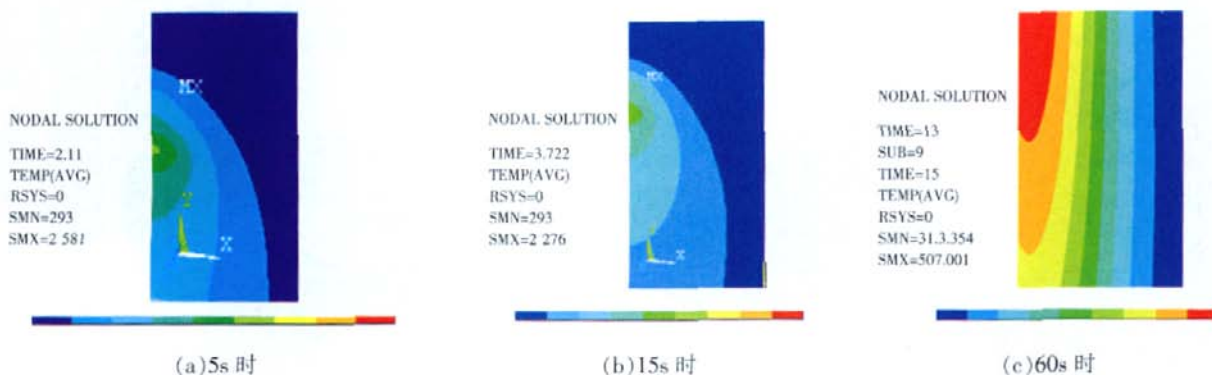


图 4 焊接过程中零件在不同时刻的温度场平面云图
Fig.4 Nephogram of temperature field at different time during welding process

图5为焊接过程中零件切面上不同深度的热循环曲线,如图所示,在0~2s时间段内,此切面上的温度值保持在室温20℃,这是因为在0~2s内,激光束未扫描到此处点,此点保持“死状态”;当2~3s激光束运动打到此点时,此点所处的单元被‘激活’,此处的单元参与传热计算,因此它的温度由室温剧增,温度升至材料熔点时,表面材料发生熔化、液化、气化,但在此处的不同深度,温度分布逐渐变弱。当3s以后,随激光束的继续移动,激光束离开此点并逐渐远离,此点的温度开始下降,激光束运动到下一点时,下一点处单元被“激活”,温度变化情况与上述类似。图6为激光焊接过程中,各沉积层上的温度时间历程,可以看出,熔覆层不同位置的点具有不同的热循环特征,温度场分布呈动态变化,激光束每扫过一次,熔覆层

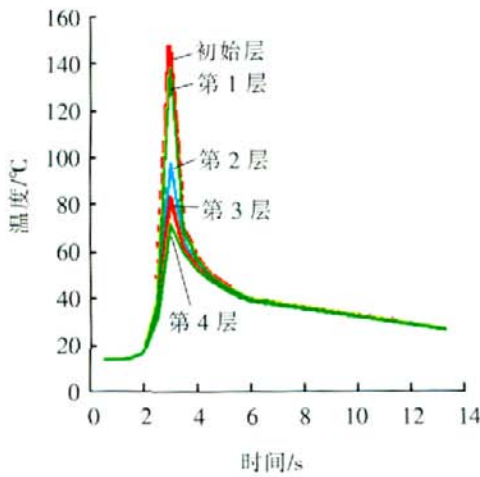


图5 不同深度处的热循环曲线
Fig.5 Thermal cycle at different depth

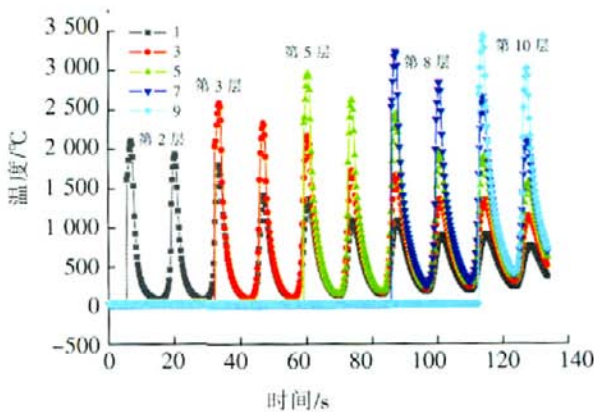


图6 熔覆层不同高度的温度-时间历程
Fig.6 Time-temperature history of cladding layer at different depth

各点温度经历一次急冷急热的循环过程。熔覆层数越多,最高温度越高,最高温度和最低温度的差值越小。

4.2 应力场结果分析

图7为沉积12s时采取瞬间冷却,零件内X方向热应力分布图,图8为沉积12s时采取瞬间冷却,零件内Y方向热应力分布图。如图所示,在沉积过程中,沿X方向的热应力为拉应力,沿Y正方向热应力为拉应力,但沿Y负方向热应力为压应力。瞬间冷却使得沉积层外表面受拉应力作用,内部受压应力作用。

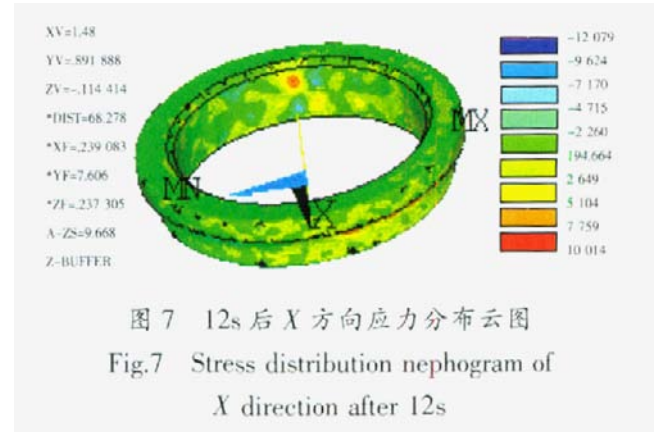


图7 12s后X方向应力分布云图
Fig.7 Stress distribution nephogram of X direction after 12s

图9是工件表面沉积处一点采取瞬间冷却后Y(纵向)方向应力变化曲线,当加热时,此点的材料为压应力,加热后很短时间内,压应力上升为拉应力,并且应力值随温度的下降而上升。从图中可见,在激光焊接热源的前方,由于材料的热膨胀引起一个压应力区,这个压应力值可以超过该温度下的屈服极限,从而使材料发生压缩塑性变形;当材料进入激光加热区后,焊接区的材料被熔化,应力得以释放,此时出现一个应力值为零的区域。此后,随着激光热源向前移动,焊接区的材料冷却下来,随温度的下降,材料的屈服强度逐渐上升,所产生的压缩塑性变形使得该区域出现拉应力,并且应力值随着温度的下降而逐渐上升。

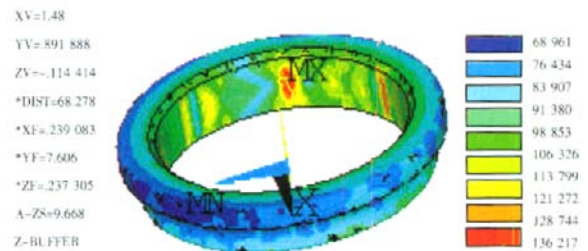


图8 12s后Y方向应力分布云图
Fig.8 Stress distribution nephogram of Y direction after 12s

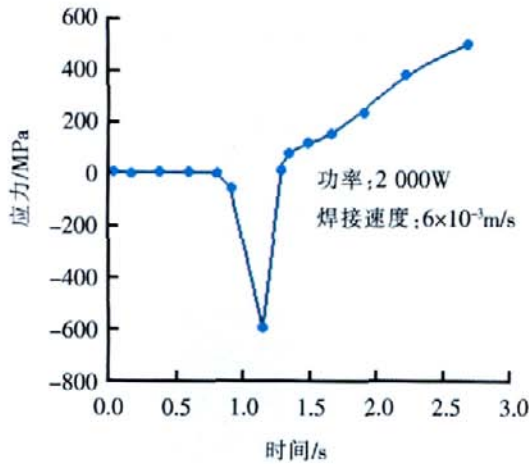


图9 沉积层上一点纵向应力演变过程
Fig.9 Evolution of longitudinal stress on one point of the sedimentary

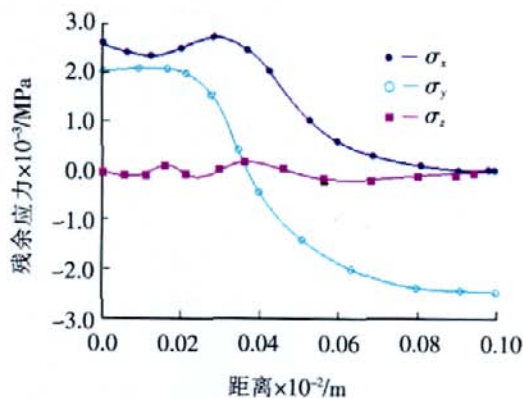


图10 冷却后的残余应力分布
Fig.10 Distribution of residual stress after cooling

图10表示焊件上表面中心线焊接残余应力的变化(因Y轴对称,仅取一半)。从图中可以看出,仅在沉积层及附近存在较高的拉应力且最大,随着远离焊点,拉应力渐渐减少,但在焊接过程中总存在一部分残余热应力,若此残余热应力超过材料的“屈服应力”,则发生塑性变形,使零件的尺寸精度受到影响;若此残余热应力超过材料的抗拉强度,零件就会产生裂纹。

5 结论

建立了基于 Gauss 曲面体热源模型的移动热源作用下的三维数学模型,对激光焊接温度场、热应力

场进行了移动线热源条件下非稳态计算。并利用 ANSYS 软件,建立钛合金管口非线性弹塑性热力耦合有限元模型,对高斯分布热源作用下的激光焊接温度场、热应力场进行了三维瞬态有限元模拟分析,得出了以下结论:

(1)激光焊接过程采用瞬间空冷后,新的沉积层进入冷却状态,沿激光束运动方向的热应力为拉应力,垂直沉积层方向的热应力也为拉应力。

(2)焊件内应力随光束移动呈动态变化,沉积区及附近存在较大的焊接残余拉应力,应力最大值接近或超过材料的屈服强度,离开焊缝区后焊接残余应力迅速衰减为压应力。

参 考 文 献

- [1] 孔祥谦. 限单元法在传热学中的应用. 科学出版社, 1998.
- [2] 郭宽良. 值计算传热学. 合肥:安徽科学出版社, 1987.
- [3] 王明伟, 张立文, 裴继斌, 等. 温度对 BT20 合金筒形件真空热胀形影响模拟研究. 材料热处理学报, 2007, 28(2).
- [4] Penasa M, Rivela C. Application of the laser welding process to low thickness stainless steels. Welding International, 2003, 17: 947-957.
- [5] Vedani M. Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG Laser repair welding. Journal of Material Science, 2004, 39: 241-249.
- [6] Sherman Mcelroy, Dehua Yang, Ramanag. Laser processing of titanium aluminides, Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9: 506-515.
- [7] 丁林, 周永涛, 李明喜. T型接头激光焊接的温度场和应力场的数值模拟. 安徽工业大学学报, 2007, 24: 384-388.

(责编 淡蓝)

(上接第 84 页)

参 考 文 献

- [1] Hwang Guang Chyan, Lin Shih Chang. A stability approach to fuzzy control design for nonlinear systems. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 48: 279-287.
- [2] Tang Y. Terminal sliding mode control for rigid robots. Automatica, 1998, 34(1): 51-56.
- [3] Han-Xiong Li, Gatland H B, Conventional fuzzy control and its enhancement, IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, 1996, 26(5): 791-797.
- [4] 李二超, 刘微容, 李炜. 基于 WinCC 和 Matlab 的一种简单在线仿真方法. 实验技术与管理, 2008, 3(25): 69-72.

(责编 金卯)