激光焊接铝合金材料过程的建模与仿真

卢艳^{1,2},张静²,胡敬佩²,项俊锋³

(1.重庆大学光电工程学院,重庆 400044; 2.重庆广播电视大学机电工程学院,重庆 400052; 3.重庆大学国家传动重点实 验室,重庆 400044)

摘 要:在试验基础上,利用有限元软件 ANSYS对 3A21 铝合金材料激光焊接温度场进行了动态模拟。通过对激 光焊接非线性瞬态过程的分析,分析与温度场有关的潜热、热传导、对流、辐射等材料热物理属性,建立了激光焊接的移 动热源模型。仿真结果表明:激光焊接薄板铝合金的温度场梯度大,热影响区小;温度场中各点温度呈指数式升高和衰 减;焊缝和近焊缝区温度升降急剧,焊缝宽度的仿真结果与试验结果相一致,从而验证了所建立的移动热源模型在激光 焊接铝合金薄板温度场模拟中的适用性,在一定程度上揭示了激光焊接的成型机理。

关键词:ANSYS;铝合金;激光焊接;仿真

中图分类号:TG146.2;TG456.7 文献标识码:A 文章编号:1001-3814(2012)01-0130-04

Modeling and Simulation of Laser Welding for Aluminium Alloy

LU Yan^{1,2}, ZHANG Jing², HU Jingpei², XIANG Junfeng³

(1.College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2.College of Mechanical & Electrical Engineering, Chongqing Radio & TV University, Chongqing 400052, China; 3.The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The distribution of the temperature field during laser welding based on aluminium alloy 3A21 was dynamically simulated by FEA software-ANSYS. In view of the highly non-linear characters of laser welding, a travel heat source combining with the body loads was built by analyzing the thermal physical parameters of material, such as latent heat of fusion, thermal conduction, convection and radiation. The results show that the temperature gradient of laser welding is larger, and HAZ is smaller than others. The temperature curves in the temperature fields rise and decline exponentiall, and the temperature in weld and near weld changes rapidly. The simulation results of width in the weld is in line with the experimental results, which verify the applicability of the model established by moving heat source during the laser welding based on aluminum alloy sheet applying to the temperature field simulation, and to a certain extent, the forming mechanism of the laser welding is revealed.

Key words: ANSYS; aluminum alloy; laser welding; simulation

铝合金材料激光焊接时,由于铝合金的高反射 率、焊前预处理要求高及焊缝中缺陷形成原因复杂, 焊接质量不稳定,工艺性不高,因而激光焊接铝合金 材料的工艺研究是目前研究的难点。由于激光焊接 是一个快速而不均匀的热循环过程,焊缝附近出现 很大的温度梯度,因此在焊后的结构中也会出现不 同程度的残余应力和变形,这些都成为影响焊接质 量和使用性能的重要因素。准确的认识焊接热过程, 对焊接结构力学分析、显微组织分析以及最终的焊 接质量控制具有重要意义^[1]。以往对激光焊接温度 场、应力应变场的分析都是通过试验的方法测量采

收稿日期:2011-07-25

作者简介:卢艳(1977-),女,工学硕士,讲师,四川成都人,目前在重 庆大学攻读博士学位;电话:13098763375; E-mail:loisyan@sohu.com 集数据,进行定量分析。由于受试验条件等方面的限制,所得数据的精确度并不高,而且浪费大量的人力、物力和时间。虽然这些问题可以通过解析方法即解某些特定的微分方程组来进行定量计算,然而,只有在非常简单的情况下,并且作许多简化的假设,才有可能求得这些方程闭合的解析解,而激光焊接边界条件十分复杂,用解析方法求解这类问题是十分复杂的,在高速电子计算机发展的今天,大多采用数值模拟的方法^[2]。利用数值模拟技术认识其焊接热过程,无疑对掌握铝合金激光焊焊接温度场的分布规律、减少焊接缺陷、控制焊缝成形、实现质量监控等具有重要的理论意义和实际应用价值。

本文在结合试验并分析激光焊接特点的基础 上,建立了一种移动高斯热源模型,研究了在移动点 热源和高斯分布作用下激光焊接瞬态温度场,采用 ANSYS 有限元分析方法,建立了薄板激光焊接温度 场的计算模型并编制了相应的有限元程序,通过与 试验结果对比分析,验证了建立的移动高斯热源模 型在焊接温度场模拟中的适应性。

1 实验材料与方法

试样材料为铝合金 3A21,规格为 100mm×50mm× 2 mm 的两板搭接组成;试验采用 JEM-1GY-400E 多 功能激光器,试验参数如下:激光焊接功率 400W,焊接 速度 260 mm/min,激光脉宽 8ms,焦距 150mm,光斑 直径 1.5mm,环境温度 20℃(室温)。

将试样放在焊接夹具上,在电流为 300 A、脉宽 为 8 ms、频率为 8 Hz 的激光下进行试样的制备。

2 焊接温度场模拟

2.1 数学模型

激光焊接过程是一个复杂的加热和散热过程, 其焊接过程是高度的非线性瞬态,材料的热物理性 能随着温度的变化而剧烈变化,通常利用傅立叶分 析方法实现对非稳态传热问题的分析。根据傅里叶 公式和能量守恒定律建立热传导控制方程:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q(x, y, z, t) + H$$
(1)

式中:T为温度;t为时间; ρ 为密度; κ 为导热系数;c为比热容;Q为体热源热流密度;H为相变潜热。

在温度场计算中,熔化时的相变潜热对温度场 分布有很重要的影响,当温度达到熔点后,温度将保 持不变,直至潜热全部被吸收或放出完为止。在有限 元模型中,相变潜热常用焓来表示,焓的定义式为:

$$H = U + PV \tag{2}$$

式中:H为焓;U为内能;P、V分别为压力和体积。 2.2 材料属性

材料的化学成分(质量分数,%)为:0.21Si,0.47Fe, 0.08Cu,1.17Mn,0.01Mg,0.03Zn,0.02Ti,余量为Al。 将材料的化学成分输入到JMatPro 铝合金材料中, 可以得到材料的随温度变化的高温热物理性能参 数,然后选择以ANSYS 格式输出,从而得到材料的 热物理属性。

2.3 热源模型

对于激光焊接温度场的数值计算,一般采取与 电弧焊类似的处理方法,常可将热源看成点热源或

《热加工工艺》2012年第41卷第01期

面热源,面热源的能量密度分布主要为高斯热源分布 或圆形光斑内的均匀分布。在真实试验环境下采用激 光进行点焊,通过工作台的移动获得类线状的焊缝, 因此在仿真环境下把热源看成点热源或二维热源处 理。图1所示为激光焊接过程示意图。激光束照射到 2mm 厚铝合金板材上后,在激光聚焦位置产生激光 照射光斑,并在光斑位置附近形成高温区域。



由于作用于焊件表面的总热量等于焊接电弧的 有效功率,根据文献[3]推导出:

$$q_m = \frac{3\eta P_{\text{laser}}}{\pi r_1} \tag{3}$$

式中: q_m 为激光光源中心处最大热流密度; η 为激光的吸收系数; P_{laser} 是激光焊接功率; r_l 为激光光斑半径。

铝合金对激光的吸收率是影响其激光焊的重要 参量,对温度场及熔宽影响显著⁽⁴⁾。材料对激光的吸 收率由下式决定^[5]:

$$\eta = 0.365 \{ \rho [1 + \beta (T - 20)] / \lambda \}^{1/2}$$
(4)

式中: ρ 为铝合金 20 $^{\circ}$ 的直流电阻率; β 为电阻温度 系数;T为温度; λ 为激光束的波长。

在加热光斑内的热流密度,一般近似地用高斯 函数来描述,基模激光一般认为是高斯分布,根据文 献[6]其作用区任意一点的功率密度为:

$$q(r) = \begin{cases} q_m \exp(-3r^2/r_1^2), r \le r_1 \\ 0, r < r_1 \end{cases}$$
(5)

式中:q(r)为距离热源中心 r 处的热流密度; q_m 为热 源中心处的最大热流密度; r_1 为激光光斑半径。

又由于焊接热源是以一定速度沿着焊缝移动, 如图1所示,热源随y轴移动,所以此热源模型应该 是移动的高斯热源模型,即

$$q(x,y,t) = \begin{cases} \frac{3\eta P_{\text{haser}}}{\pi r_1^2} \exp\{-\frac{3}{r_1^2} [x^2 + (y - v(t - \tau))^2]\}, r \le r_1^2\\ 0, r > r_1^2 \end{cases}$$
(6)

式中:η为激光的吸收系数;*P*_{laser}是激光焊接功率;*r*₁ 为激光光斑半径;*τ*为初始焊接位置上的时间;*v* 是热 源的移动速度;r是工件上任一点到激光光斑中心 的距离。

2.4 初始条件和边界条件

由于工件的边界与周围环境存在着温差,并且 与周围介质换热,其中包括对流换热和辐射换热。工 件的初始温度等于周围环境温度 T₀,即

$$t=0, T=T_0=293 \,\mathrm{K}$$

$$x = \infty; y = \infty; z = \infty \longrightarrow T = T_0 = 293 \text{ K}$$
(7)

焊接开始后,工件与周围环境之间发生热传递, 工件底部与夹具之间发生热对流,其热边界条件用 牛顿冷却方程描述为^[7]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h}{k} (T_s - T_0) \tag{8}$$

工件自由表面(工件的上表面)与环境之间既发 生热对流又发生热辐射,所以其热边界条件根据斯 蒂芬-玻尔兹曼方程及牛顿冷却方程描述为:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h}{\kappa} (T_s - T_0) + \frac{\varepsilon \sigma}{\kappa} (T_s^4 - T_0^4)$$
(9)

式中: T_s 为工件表面温度; T_0 为环境温度; ε 为工件辐射 率; σ 为斯蒂芬--玻尔兹曼常数,约为 5.6710⁻⁸W/(m²·K⁴); h为对流换热系数; κ 为工件热传导系数。

3 结果与分析

图 2 为激光焊接铝合金薄板在不同时刻的温度 场。可看到,激光焊接温度场是一组圆环状的等温 线,温度场分布随着热源的移动而不断变化。在工件 中下部开始,温度场趋于平衡,即进入稳态。由图 2 可见,对比 0.5 和1s 时的温度场分布图,温度场发 生了显著变化;4s 时的温度场中热影响区变大,而 熔合区的温度几乎不变,这很可能是由于在相变潜 热的作用下,铝合金达到熔点后温度变化停滞,直到 所有的潜热吸收完为止,这段时间内,铝板其他区域 也将吸收热量,使热影响区的面积扩大。



Fig.2 Temperature distribution of work pieces at different times

从图 3 可看到,在移动热源前半部分等温线密 集、温度梯度大,后半部分较稀疏、温度梯度小且越 向后越明显。光斑中心的平均温度最高,可达 748℃。当温度降低到 627~635℃时,焊接母材不再 熔化,经计算测量的单面熔宽为 0.8 mm,所以熔池 宽度约为 1.6 mm,与实际测量得焊缝宽度约为 1.55 mm 基本一致。并且由图 3 可看出,激光焊接的热影 响区较其他焊接的热影响区较小。



Fig.3 Isotherm line of work pieces at different times

图 4 所示为铝合金板上的模拟与测量点,图 5 为利用热电偶测得图 4 所示位置处各点随时间变化 的温度曲线。如 A 曲线为焊接过程中位于焊缝中心 的节点 A 随时间变化的温度变化曲线。其温度在激 光照射时迅速升高,当激光束离开后又快速降温,温 度呈指数式升高和衰减。由图 5 可看到,各点温度变 化是不均匀的,测量点位置偏离焊缝距离越远,其峰



Fig.4 Simulation and experiment points in aluminium alloy sheet

Hot Working Technology 2012, Vol.41, No.01



Fig.5 Thermal cycle curves of A,B,C point in experiment

值温度逐渐下降;在开始阶段,焊缝与近焊缝区各点 温度激增,随后渐趋平缓,靠近焊缝区域温度变化比 较快,而远离焊缝区域则变化比较慢。

图 6 是 A、B、C 三点的模拟热循环曲线。对比图 5 和图 6,发现 A、B、C 三点模拟结果的热循环曲线与 实测的热循环曲线在形状和峰值温度大小上相一致。 由此可见,基于激光焊接温度场数学模型的模拟结 果,与实际结果一致。这表明数值模拟方法的准确性。



图 6 A、B、C 三点模拟的热循环曲线 Fig.6 Thermal cycle curve of A,B,C point in simulation

(上接第 129 页)峰值降低;纵向残余塑性变形量随 着预拉力作用范围的增加,其纵向残余塑性拉伸量 增加。

(2)随着预加应力在板宽方向不同位置的加载,使得纵向残余应力的分布产生变化,随着预拉力作用区域的增加,在焊接板端的残余压应力峰值降低,同时其在焊缝部位存在的残余拉应力的峰值也随加载宽度的增加而下降。

(3) 弹、塑性残余应变场及纵向残余应力的分 布说明,在冷却过程中,与之拉伸应力增加了塑性拉 伸应变,有效抵消或消除由于焊接热源局部加热形 成的压缩塑性变形,继而降低纵向焊接残余应力的

4 结论

在本文中,建立了一个三维有限元模型来模拟铝 合金薄板的激光焊接温度场,结果演示了该模型能很 好的预测其温度场。根据模拟和试验数据,考虑到激 光焊接是高度非线性瞬态过程,设计了一个移动热 源;在用有限元法模拟温度场的时候,需要考虑材料 随温度变化的热物理性;根据模拟结果,温度场最高 温度达 730℃,激光焊接较其他焊接有较大的温度梯 度;经过对比分析,可以看出焓对温度场有显著的影 响;所建立的 3D 数学模型能很好的预测瞬态温度场 的分布,并和试验数据相一致,验证了建立的移动高 斯热源模型在焊接温度场模拟中的适应性。

参考文献:

- [1] 薛忠明,顾兰,张彦华.激光焊接温度场数值模拟[J].焊接学报,2003,24(2):79-81.
- [2] 余淑荣,熊进辉,樊丁,等. ANSYS 在激光焊接温度场数值模拟中的应用[J]. 焊接技术,2006,35(5):6-7.
- [4] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [4] 胡敏英,时君伟,蔡金金. 铝合金表面吸收率对焊缝成型的影响[J]. 金属铸锻焊技术,2009, 38(21):150-151.
- [5] 王承伟,曲仕尧,王新洪,等. 铝合金激光焊接的研究现状和发展趋势[J]. 焊接与切割,2008,(8):38-40.
- [6] 陈彦宾.现代激光焊接技术[M].北京:科学出版社,2005.
- [7] Shanmugam N Siva, Buvanashekaran G, Sankaranarayanasamy K, et al. A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds [J]. Materials and Design,2010,31: 4528-4542. EI

峰值,达到控制焊接残余应力和变形的目的。

参考文献:

- [1] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京:机械工业出版社,2008.1-2.
- [2] Zhou G T, Liu X S, Jin C, et al. Welding deformation controlling of aluminum-alloy thin plate by two-direction pre-stress method [J]. Materials science and engineering A, 2009,499 (1-2):147-152.
- [3] 章明明,李敬勇. 预拉伸控制铝合金焊接变形[J]. 材料开发与 应用,2005,(2):36-38.
- [4] 阚前华,常志宇. MSC.Marc 工程应用实例分析与二次开发[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.21-53.
- [5] 工程材料实用手册编辑委员会.工程材料实用手册(3)[M].北京:中国标准出版社,1989.36-46.