

3Cr13Mo 钢板多参数 YAG 激光焊接残余应力和形变的仿真研究

刘升 贺铸 刘宇鑫

(武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘要 通过 500 W YAG 激光机以焊接速度 0.5 ~ 1.2 mm/s、电流 150 ~ 200 A、脉冲宽度 3.0 ~ 5.0 ms 和频率 18 ~ 40 Hz 参数对 5 mm 3Cr13Mo 马氏体耐热不锈钢板 (/% : 0.28C, 0.8Si, 0.36Mn, 0.030S, 0.029P, 12.10Cr, 0.57Mo, 0.45Ni) 进行焊接试验, 同时应用大型有限元软件 ABAQUS 开发建立焊接模型, 对焊接过程中温度场、残余应力场和形变进行了数值模拟。研究表明, 模拟值与实际测试值基本吻合, 计算的焊接残余应力最大值集中在距焊缝 0.1 mm 的热影响环向区, 在焊接电流 150 A, 脉冲宽度 3.0 ms, 频率 18 Hz, 焊接速度 0.5 mm/s 的工艺参数下, 最大残余应力所引起的残余塑性应变变量可达 0.325。

关键词 马氏体耐热钢 3Cr13Mo 钢板 激光焊接 残余应力 有限元软件 ABAQUS 形变

Simulation Study on Residual Stress and Distortion of 3Cr13Mo Steel Plate by Multi-Parameters YAG Laser Welding

Liu Sheng, He Zhu and Liu Yuxin

(Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The welding test on 5 mm 3Cr13Mo martensite heat resistant steel plate (/% : 0.28C, 0.8Si, 0.36Mn, 0.030S, 0.029P, 12.10Cr, 0.57Mo, 0.45Ni) with welding speed 0.5 ~ 1.2 mm/s, current 150 ~ 200 A, pulse width 3.0 ~ 5.0 ms and frequency 18 ~ 40 Hz by using a 500 W YAG laser has been carried out, and the temperature field, the residual stress and the welding distortion during welding process are numerically simulated by welding model developed and established using large-scale finite element software ABAQUS. Study results show that the calculated values basically coincide with the real measured values, the calculated maximum welding residual stress is concentrated in heat affected ring zone distance from welding seam 0.1 mm, with the process parameters-welding current 150 A, pulse width 3.0 ms, frequency 18 Hz and welding speed 0.5 mm/s, the residual plasticity strain introduced by the maximum residual stress is up to 0.325.

Material Index Martensite Heat Resistant Steel 3Cr13Mo, Steel Plate, Laser Welding, Residual Stress, Finite Element Software ABAQUS, Welding Distortion

焊接工艺广泛应用于各种加工领域, 由于其高度集中的瞬时热输入常引起极大的残余应力和形变, 对于常规的加工制造要求, 其形变常危及零部件的形状、尺寸公差及装配偏差^[1-2]。激光焊接是以高能量密度的激光束作为热源的一种高精度的连接方法, 其具有高洁净、高精度等诸多优点而广泛应用于航空航天、医疗及核工业等要求高精度和高质量的焊接领域^[3-5]。

基于大型通用非线性有限元分析软件 ABAQUS 对等离子体喷嘴材料的 YAG 激光焊接过程进行了数值模拟试验, 利用脚本语言实现了高斯双椭球热源模型^[6]的加载, 对马氏体耐热不锈钢 3Cr13Mo 的焊接温度场、残余应力场和残余塑性应变场进行了分析, 将仿真结果和实验数据进行对比, 证实了所建立数值试验模型具有可靠性, 并探寻了残余应力分布及形变规律。

1 多参数 YAG 激光焊接实验

1.1 实验材料和试样制备

实验材料为等离子体喷射喷嘴马氏体耐热不锈钢 3Cr13Mo, 其化学成分 (/%) 为 0.28C, 0.80Si, 0.36Mn, 12.10Cr, 0.57Mo, 0.030S, 0.029P, 0.45Ni。试样尺寸规格为 5 mm 厚的方板, 在焊接前需进行相关清理工序, 其处理工艺流程如下: 线切割取样 → 金属清洗液除油 → 砂纸粗磨精磨 → 水冲洗 → 酸洗 → 水冲洗 → 抛光 → 烘干 → 干燥剂密封保存。取样时由于可能存在局部氧化铁皮, 需先用砂轮机磨掉表皮而后酸洗, 酸洗液配方采用 5% 硝酸 + 95% 酒精溶液 + 少量水, 酸洗时间宜选为 1 min, 充分使焊接区呈现真表层。

1.2 多参数实验测试

焊接试样尺寸为 (mm) 50 × 5 × 15, 焊接设备为最大功率 500 W 的多功能 YAG 激光加工机, 焊接速

度分别为 0.5、1.0、1.2 mm/s, 焊接电流分别为 150、180、200 A, 焊接脉宽选用 3.0、5.0 ms, 焊接频率选用 18、30、40 Hz。为便于变形测试, 焊接区域选为试件中心, 同时使焊接变形尽可能接近自由变形, 故焊接时对试件采用单向夹具定位。采用精度为 0.01 mm 的百分表、精度为 0.02 mm 的游标卡尺和水平工作台进行焊接纵向收缩和横向收缩以及角变形测量^[7]。通过 TP-1000 型测温仪对焊接区邻域温度的变化进行测量, 其温度测量范围为 0 ~ 1000 °C, 测点在距离焊缝 4 mm 的地方, 同时在焊板上利用钢针在焊缝周围每隔 2 mm 画阶梯线, 用以对焊接过程中产生的残余塑性变形进行测量。

2 激光焊接的数值实验模型

2.1 激光焊接的热-机耦合模型

应用热弹塑性解析理论, 建立弹性变形边界的虚功方程如下:

$$\int_{\Omega} D_{ijkl} \varepsilon_{ij} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega - \left(\int_{\Omega} \bar{b}_i \delta u_i d\Omega + \int_{S_p} \bar{p}_i \delta u_i dA + \int_{\Omega} D_{ijkl} \varepsilon_{ij}^0 \delta \varepsilon_{ij} d\Omega \right) = 0 \quad (1)$$

式中: D_{ijkl} - 刚度矩阵; ε_{ij} , ε_{ij}^0 - 两方向上的微应变; \bar{p}_i - 单位面积上的作用力; u_i - 力作用上的位移; \bar{b}_i - 位移上的作用力; δ - 改变量。

激光焊接的温度场满足非线性瞬态热传导微分方程:

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (2)$$

式中: $k_x(T)$, $k_y(T)$, $k_z(T)$ - 材料沿 x , y , z 三个方向的热传导系数; $\rho(T)$ - 材料的密度; $c(T)$ - 材料的比热容; Q - 内热源^[8]。计算过程以残余塑性应变为研究对象, 故可简化温度场应力场计算, 取其剖面进行分析计算, 可设定边界条件如下:

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} + q + a(T - T_0) + \sigma \zeta (T^4 - T_0^4) = 0 \quad (3)$$

式中: 设材料各项同性, k_x , k_y - x , y 方向的热传导系数; Q - 内热源; c - 材料比热容; ρ - 材料密度; \bar{q} - 流经边界的比热流密度; ζ - 体表面的发射率; a - 表面换热系数; σ - Stefan-Boltzmann 常数, 数值大小为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

2.2 仿真热源模型

激光焊接不同于 TIG 氩弧焊等, 其焊接熔池的

大小取决于激光光斑的大小, 因此在建立模型时对于激光热源可选用三维移动热源模型^[9], 假设热源在半径方向呈现高斯分布, 而在板厚方向呈现指数衰减。其表达式如下所示:

$$Q(r, z) = \frac{9P}{\pi r^2 z} \exp\left(-3 \frac{r^2}{r_0^2} - 3 \frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

式中: 有效半径 r_0 和能量深度 z 为能量密度下降到峰值的 5% 处的值。 P 为激光有效功率, 研究表明, 对于 YAG 激光器的激光焊接, 在改变输入功率参数后, 激光的吸收系数仍然可以保持在 0.7 ~ 0.8, 在本实验室中的激光器采用的三级反射镜和一级聚焦镜对激光能量的传递损失以及材料表面对激光反射作用导致的能量损失, 可取激光的功率系数为 0.76。实验中测量对象为轴对称不均匀残余变形应力状态, 需要采用变异的钻孔释放法进行测量, 测量时设在焊件厚度方向应力不变, 在测量基线内逐渐把孔径钻大, 采用弹塑性变形类似法从测量基线长度的改变到初始状态的残余应力进行顺次反算^[10]。

3 实验结果及分析

在功率 500 W 的 YAG 多功能激光加工中心上进行焊接, 通过修改不同的激光工艺参数, 焊接电流、焊接脉宽、焊接频率以及焊接速度, 对比各组焊接工艺参数下的焊缝形貌, 发现焊接电流 150 A, 焊接脉宽 3.0 ms, 焊接频率 18 Hz, 焊接速度 0.5 mm/s 时焊缝处毛刺最少, 熔滴最少、焊接过程中飞溅, 焊缝处形成致密的均匀的鳞片层状形貌, 由此可知, 此时参数设定为最优。

由于残余应力分布不确定而又使得测量较难, 因此, 本试验选用尺寸为 (mm) 50 × 5 × 15 的板材进行残余应力与残余形变的有限元模拟测试实验, 如图 1 所示。为了使得建立的焊接模型误差最小, 采用 TP-1000 测温仪进行焊接区域的温度场的测定, 并将所测得温度场和模拟温度场进行比较, 以此来修正焊接模型。

采用反算法根据测温仪所测量的实际温度建立多元方程计算出有限元模型的理论边界条件和材料的热物理性能参数, 经过多次修正后确定最优焊接模型。图 1(a) 所示为进行实验时温度测量点的位置示意图, 图 1(b) 则表示的是建立焊接模型所划分的网格, 得到如图 1(c) 所示距离焊缝 4 mm 处的温度场, 并和实际测量温度进行比较具有很好的符合性, 说明经过模型所计算出来的残余应力也具有

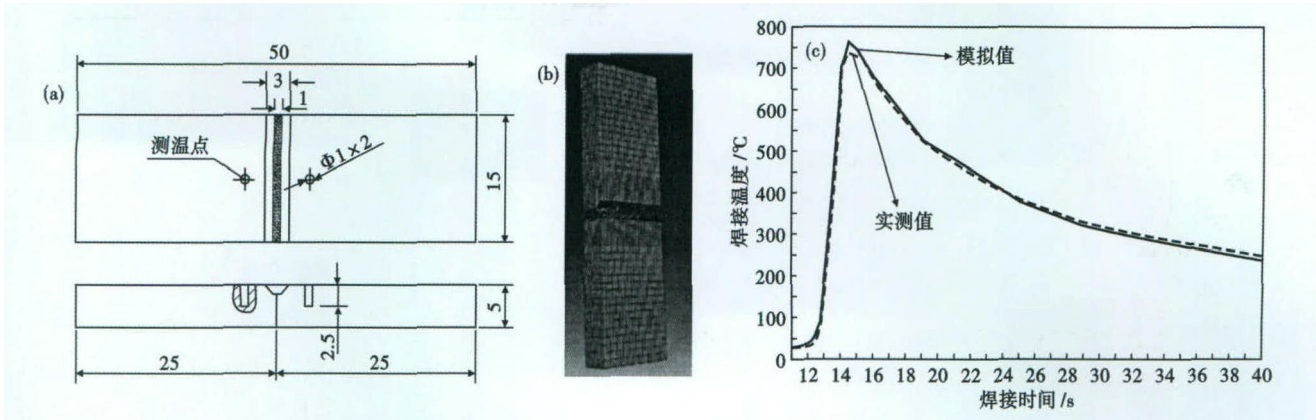


图1 (a) 温度测量点示意图;(b)有限元网格划分;(c)焊接模拟温度与实测温度比较

Fig. 1 (a) Schematics of temperature measure location; (b) finite element mesh division; (c) comparison between welding simulated temperature and real measured temperature

定的可信度。由于测量点位于焊缝中心对称面上,固有当开始焊接时热源是从下方开始往上方移动,当经过焊缝中心时是离测量点最近,所以此时的温度变化很快,而后焊接完成后温度开始迅速下降而传递给材料其他部分,呈现如图 1(c) 所示的温度变化。

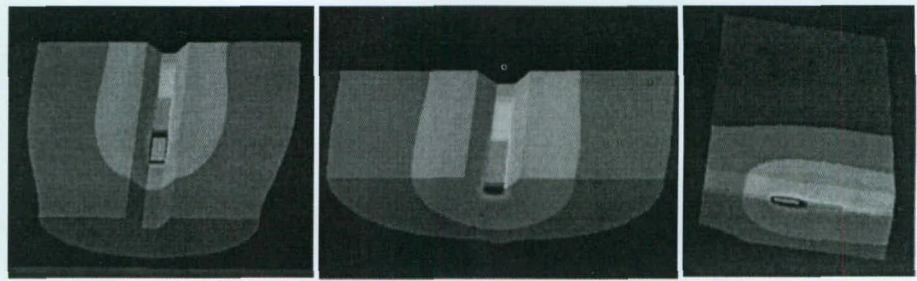


图2 激光焊接结构内温度场分布图:(a)热源经过焊缝中心处;(b)横断面热源处和(c)纵断面热源处

Fig. 2 Temperature field distribution in laser welding structure at heat source passing center location of welding seam (a); heat source of cross section (b) and heat source of longitudinal section (c)

应用有限元软件对激光

焊接的温度场和残余应力场进行计算,图 1(c) 所示为有限元模型计算温度值与测温仪所测温度值的比较图,两者基本吻合,从而验证了模型的准确性。由于焊接工艺的特殊性,有效加热区域较小,模型划分网格时通常在焊缝区采用尺寸较小的网格,远离焊缝区可为了便于计算而将网格划分得较大。

图 2 所示为焊接过程中热源刚好移动到中心处时结构内部温度场的分布情况,可看出,焊接时热源和在金属表面接触处的温度最高基本达到材料熔点,但材料连接处是通过表面的熔化层而填满,温度呈现近似环向梯度变化,这主要是定义热源时考虑了激光焊点是一个方形的小孔,且其能量随着热源的移动而在每个点的传递均为均匀的,因此,并没有出现类似传统的椭圆形的温度分布情况。缝口温度较高并且两坡面金属被熔化时连接成型焊缝,随后芯部温度变化较快,这是由于外表面未结束焊接时还有熔化的金属堆积在表面的缘故。

在模拟实验结果中测量距离焊缝中心各处的横向和纵向残余应力值以及该处横向和纵向残余塑性应变的值并绘出曲线如图 3 所示。

图 3(a) 中实线显示距离焊缝中心位置 0.1 mm 处有最大横向残余应力 180 MPa 的拉应力,而在距离焊缝中心 0.65 mm 处有最大横向残余应力为 80 MPa 的压应力;图 3(b) 实线显示的为距离焊缝中心位置的横向残余塑性应变,由于焊缝总长为 15 mm,则依据计算测得的距离中心两边各 7.5 mm 的残余塑性应变变化趋势为关于中心对称,最大残余塑性应变在焊缝中心处为 2.25,这种变化趋势是由于焊接时焊接速度较快,且残余塑性应变主要是由于焊接时温差所导致,在焊接区温度最高而离开焊接处以后温度就瞬时降低很多,由此导致变形急剧下降。

图 3(a) 虚线显示焊接时距离焊缝中心位置的纵向残余应力分布规律曲线,纵向残余应力由于受到焊接板两侧的夹具约束同时焊缝处有大量热量损失,因此其最大残余应力值较横向要小只有 125 MPa 的拉应力是在距离焊缝中心位置为 1.0 mm 处,而在距离焊缝中心 5.0 mm 处则受到 75 MPa 大小的压应力,温度也有传递来却没有焊缝的变化剧烈;图 3(b) 虚线显示距离焊缝中心位置的纵向残余

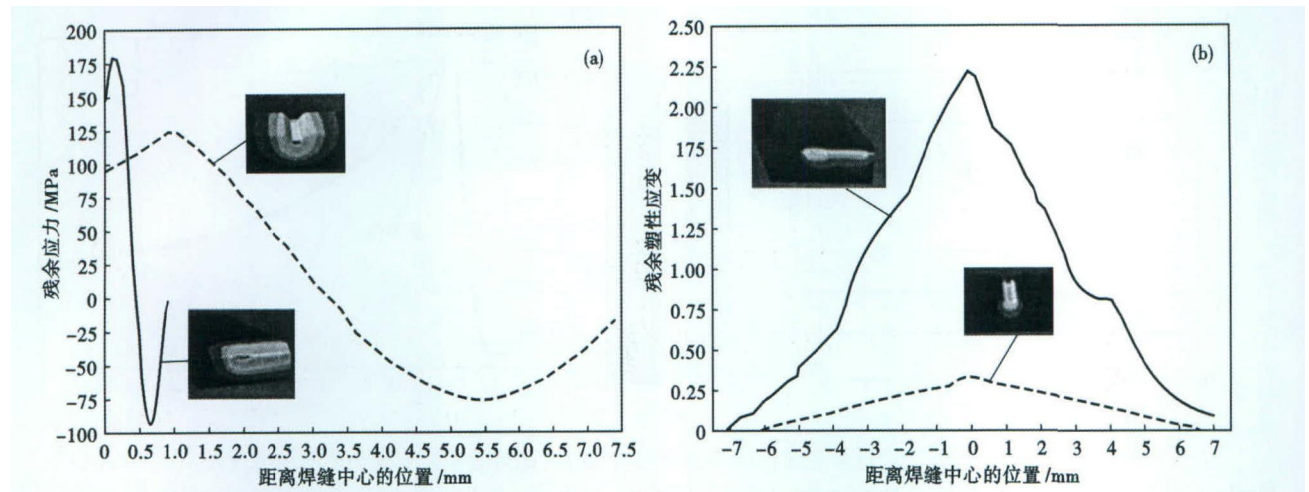


图 3 激光焊接残余应力分布图 (a) 和残余塑性应变图 (b): (a) 横向-纵向残余应力与距离焊缝中心位置的关系; (b) 横向-纵向残余塑性应变与距离焊缝中心位置的关系

Fig. 3 Diagram of distribution of residual stress field (a) and residual plastic strain (b) of laser welding: (a) relation between cross-longitudinal section residual stress and distance from center location of welding seam; (b) relation between cross-longitudinal section residual plasticity strain and distance from center location of welding seam

塑性应变的变化规律,其变化和横向残余应变类似,在焊缝处纵向残余塑性应变最大可达 0.325,纵向变化较之于横向变化要明显小很多,主要是由于焊板两侧有夹具的约束作用。

4 结论

(1) 通过修改不同的激光工艺参数,获得了材质为 3Cr13Mo 的马氏体耐磨不锈钢的最优 YAG 激光焊接参数为焊接电流 150 A,焊接脉宽 3.0 ms,焊接频率 18 Hz,焊接速度 0.5 mm/s。

(2) 利用有限元软件 ABAQUS 建立了 YAG 激

光焊接数学模型,根据焊接实际情况在所建立的数学模型中采取叠加点状热源的方式来获得线状热源,同时采用高斯热源模型可基本满足焊接温度场和应力场的求解准确度。

(3) 对激光焊接过程中的温度实测值和模拟计算值进行比较,两者基本吻合,从而验证了模型的准确性,并且得到焊接残余应力最大值集中在距焊缝 0.1 mm 的热影响环向区,最大残余应力所引起的应变变量可达 0.325,可用作装配尺寸的公差使用。

国家科技支撑计划项目资助(2011BAK06B02)

参考文献

- [1] 王者昌. 关于焊接应力应变问题的再探讨[J]. 焊接学报, 2006, 27(8): 108-112.
- [2] Deng Dean. Theoretical Prediction of Welding Distortion in Thin Curved Structure during Assembly Considering Gap and Misalignment[D]. Doctoral Thesis, Osaka University, 2002.
- [3] 毛卫平, 宁吉平, 刘贵维, 等. 不锈钢薄板激光对接焊有限元仿真分析[J]. 金属铸锻焊技术, 2009(10): 122-125.
- [4] Yue T M, Xu J H, Man H C. Pulsed Nb-YAG Laser Welding of A SiC Particulate Reinforced Aluminium Alloy[J]. Applied Composite Materials, 2003, 4(1): 53-64.
- [5] 何小东, 张建勋, 裴怡, 等. 线能量对 TC4 钛合金激光焊接残余应力和变形的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(5): 774-777.
- [6] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [7] 王春明, 胡伦骥, 胡席远, 等. 钛合金激光焊接过程中等离子体光信号的检测与分析[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 83-86, 90.
- [8] 游敏, 郑小玲, 余海洲, 等. 关于焊接残余应力形成机制的探讨[J]. 焊接学报, 2003, 24(2): 51-58.
- [9] Zeng H, Zhou Z, Chen Y, et al. Wavelet Analysis of Acoustic Emission Signals and Quality Control in Laser Welding[J]. Journal of Laser Applications, 2001, 13(4): 167-173.
- [10] Susumu Nakamura, Macaya Sakural. Detection Technique for Transition Between Deep Penetration Mode and Shallow Penetration Mode CO₂ Laser Welding of Metals[J]. Journal of Physics D, 2000, 33: 2941-2948.

刘升(1984-),男,博士生(武汉科技大学),工程师,2007年江汉大学(本科)毕业,材料加工过程的数值模拟及产品质量控制、工艺优化及设计。E-mail: Liu.sh2008@163.com

收稿日期: 2013-12-25