

# 激光焊接汽车双联齿轮温度场和残余应力的有限元预测

房晓兰

(上海博杰科技有限公司 技术部, 上海 200120)

**摘要:**基于 SYSWELD 有限元分析软件, 预测了不同离焦量下 CO<sub>2</sub> 激光焊接汽车双联齿轮的温度场及残余应力的分布, 并对模拟结果进行了分析。数值模拟时, 考虑材料热物理性能与温度的非线性关系, 以及相变潜热对温度场的影响。将模拟结果与前人的相关研究结果进行了比较, 验证了热源模型和网格模型的合理性, 模拟结果基本可信。

**关键词:**激光焊; 双联齿轮; 有限元分析; 温度场

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2012)11-0185-03

## Finite Element Prediction of Temperature Field and Residual Stress of Laser Welding Automobile Duplex Gear

FANG Xiaolan

(Department of Bojie Technology Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Based on finite element analysis software SYSWELD, the distribution of temperature field and residual stress of laser welded automobile duplex gear under different defocusing amount was predicted, and the simulation result was analyzed. In simulation, the nonlinear relationship between material's thermal and physical properties and the temperature, as well as the influence of transformation latent heat on the temperature field were considered. The simulation results were compared with that of previous researches. The results show that the heat source model and the grid model results are verified to be reasonable, which show that the simulation results are credible.

**Key words:** laser welding; duplex gear; finite element analysis; temperature field

作为一种高效精密的焊接方法, 激光焊接具有焊缝及热影响区窄、变形及残余应力小、生产效率高、易于实现自动化和精确控制等优点, 目前已在汽车工业领域得到广泛应用。由于焊接温度场(热场)是造成焊缝区域金相组织状态变化, 进而诱发焊接结构变形及产生残余应力的首要的(也是主要的)原因, 因此对焊接热过程的研究一直是焊接工作者研究的重点<sup>[1-2]</sup>。激光焊热源具有加热时间短、升温速度快等特点, 加之激光焊时激光束作用的区域一般都较为窄小, 采用常规手段难以对焊缝及热影响区所经历的热循环进行准确的测量。近年来, 随着有限元技术的不断完善和发展, 基于非线性有限元数值模拟方法已可以比较准确的计算焊接温度场、焊接残余应力和焊接变形<sup>[3-4]</sup>。因此, 采用数值模拟方法代替实验手段来研究激光焊接条件下的热过程具有重要意义。

本文以工程应用为目的, 利用 SYSWELD 有限元分析软件, 采用 3D-圆锥体热源模型, 通过改变热源上下平面距离(参数设置), 代替实际焊接过程离焦量的变化, 计算不同离焦量条件下 CO<sub>2</sub> 激光焊接汽车双联齿轮的热过程, 分析了焊接温度场及热循环特征, 预测了焊缝形态及焊接热影响区宽度, 并将计算结果与实验所得结果进行了比较。

### 1 试验条件

研究对象为某汽车零部件制造厂生产的汽车变速箱用双联齿轮, 其 3D 模型如图 1(a)所示。齿轮材料为

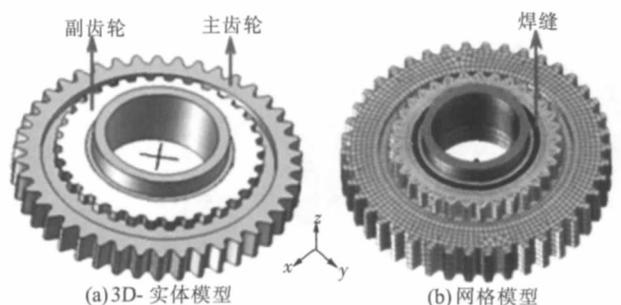


图 1 3D-实体模型与网格模型

Fig.1 3D-solid model and mesh model

收稿日期: 2012-01-09

作者简介: 房晓兰(1972-), 女, 江苏盐城人, 机械工程师, 大专, 主要研究方向: 机械设计及加工; 电话: 13916835748;

E-mail: fangxiaolan@163.com

20CrMnSi 低合金高强钢。焊机型号为 RofinDC030 CO<sub>2</sub> 激光器,激光波长为 10.6 μm;热输入功率 2400W;焊接速度 1200mm/min;保护气体为氩气,流量为 15 L/min;入射激光斑点直径 0.2mm;焦距 198.5mm,静止焦距 200mm;离焦量分别为-0.5、0、+0.5mm。

## 2 有限元模型

### 2.1 网格划分

为了保证计算精度且节省计算时间,采用非均匀网格,焊缝及其附近区域网格划分较细(0.96 mm),由焊缝至远离焊缝区域网格尺寸逐渐增大(最大 3 mm)。本模型为一回转体,沿圆周方向将模型分为 132 等份,单元类型为 8 节点六面体和 4 节点四面体单元,节点数为 28188,单元数为 35328。焊接区域厚度为 8 mm,模型网格划分如图 1(b)所示。

### 2.2 热源模型

热源模型采用 3D 锥体热源模型,该热源模型的实质是一系列平面高斯热源沿焊件厚度方向的叠加,而每个截面的热流分布半径沿厚度方向呈线性衰减,而热流密度在电弧中心线(z 轴)上保持不变。采用 3D 锥体热源模型,在任一垂直于 z 轴的平面内,热流分布数学表达式为:

$$q(r,z) = Q_0 \exp(-3r^2/r_0^2) \quad (1)$$

式中:Q<sub>0</sub> 为热流密度最大值,其数学表达式为:

$$Q_0 = \frac{9\eta IUe^3}{\pi(e^3-1)} \times \frac{1}{(z_e-z_i)(r_e^2+r_e r_i+r_i^2)} \quad (2)$$

r<sub>0</sub> 为热流分布半径,其数学表达式为:

$$r_0 = r_e - (r_e - r_i) \frac{z_e - z}{z_e - z_i} \quad (3)$$

在(1)、(2)、(3)式中:η 为激光的热效率,取值为 0.95;IU 为激光发生器功率,为 2400 W;r<sub>e</sub>、r<sub>i</sub> 为热源作用工件、下表面的热流分布半径,取值分别为 2 和 1;z<sub>e</sub>、z<sub>i</sub> 为热源作用工件上、下表面的 z 坐标位置,取值分别为 19 和 14。

热源在对模型加热过程中的热传导是一个非线性的过程,对于此过程中的瞬态非线性传热分析方程可表述为<sup>[5]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + q_i (t \geq 0) \quad (4)$$

式中:T 为材料的瞬时温度,℃;λ 为材料的热导率,W/(mm·℃);q<sub>i</sub> 为热源单位时间产生的热量,W/mm<sup>3</sup>;ρ 为材料密度,g/mm<sup>3</sup>;c 为材料的比热容,J/(g·℃)。

### 2.3 材料热物理性能

材料焊接过程温度场和力学性能模拟结果的准确性与材料热物理性能参数密切相关,这些热物理性能参数包括热传导、比热容、密度、弹性模量、泊松比、热应变、屈服极限。以上材料属性均是随温度变化的,需要从室温到熔点间取值。本文采用材料性能模拟软件 Jmatpro 计算以上所需各热物理性能参数,根据计算结果创建 20CrMnSi 材料性能数据库,导入 SYSWELD 软件进行计算。

### 2.4 边界条件

假设加热区域内部温度一致,没有热的对流,只考虑热源与周边区域的热传导以及工件与空气的对流和辐射。工件与空气之间的对流热交换遵循 Newton 冷却方程:

$$q_a = -h_a(T_s - T_a) \quad (5)$$

式中:q<sub>a</sub> 为工件与周围空气之间的热交换能量;h<sub>a</sub> 为对流热交换系数;T<sub>s</sub> 为工件表面温度;T<sub>a</sub> 为工件周围空气的温度,取为 20℃。在温度计算中,假设 h<sub>a</sub> 为定值<sup>[6]</sup>,取 h<sub>a</sub> 为 15×10<sup>-6</sup>W/(mm<sup>2</sup>·℃)。

热辐射散失的热量 q<sub>r</sub> 遵循 Stefan-Boltzman 定理:

$$q_r = -\varepsilon \sigma [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (6)$$

式中:ε 为辐射系数,取值为 0.8<sup>[7]</sup>;σ 为 Stefan-Boltzman 常量,其值为 5.67×10<sup>-8</sup>W/(m<sup>2</sup>·k<sup>4</sup>)。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 温度场模拟结果分布

图 2 是离焦量为-0.5mm 时熔池准稳态下的整体云图;图 3 为不同离焦量条件下熔池准稳态下的截面云图。由图 3 可以得出以下结论:功率相同情况下,离焦量为-0.5mm 时熔池深度较深,且熔宽较宽;离焦量为+0.5mm 时焊缝上部熔宽较宽,熔深较离焦量为 0mm 和-0.5mm 时浅。这是因为离焦量为-0.5mm 时,内部能量密度高于表面,内部金属强烈的熔化、蒸发有利于热量向下的传导,从而导致熔池底部熔深增加,这与实际焊接过程所得出的结果一致。

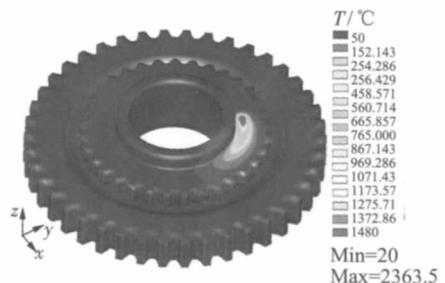


图 2 离焦量为 -0.5 mm 时的温度场整体云图  
Fig.2 Whole contours of temperature fields under -0.5 mm defocusing amount

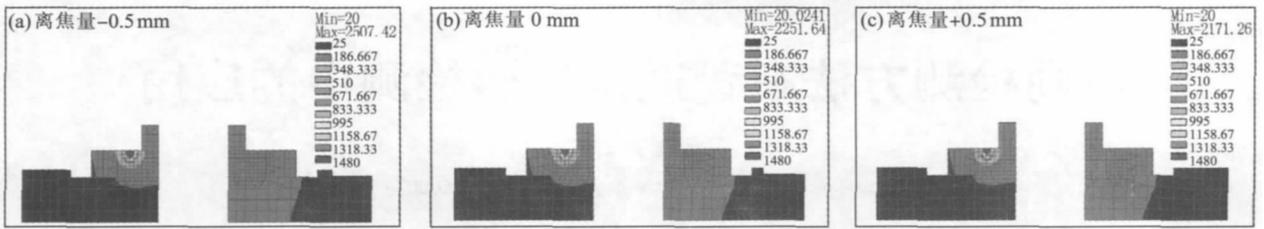


图3 不同离焦量条件下的温度场截面云图(°C)

Fig.3 Cross section contours of temperature field under different defocusing amount(°C)

### 3.2 焊接残余应力模拟结果分析

为了考察焊缝及其附近的应力分布状况,在焊接线以及焊接线两侧垂直于焊接线方向取参考点,参考点位于齿圈的上表面;同时,由于焊接起始点附近区域经过二次加热,故其应力和变形分布必然不同于焊接过程中的准稳态区域,所以为了考察焊接起始点和焊接准稳态区域的应力分布的不同特点,在0°、90°、180°、270°这四个区域分别取参考点,取点位置如图4所示。

图5为不同离焦量条件下,  $t=600\text{ s}$  时的齿轮上表面径向和周向残余应力分布图。图中横坐标代表焊缝附近位置,0点代表了焊缝中线,曲线上的点对应图4中的取样点。由图5可以发现:①不同离焦量条件下的应力分布具有相同的趋势,尽管应力值大小有所差异,但是差别不大,其中离焦量为-0.5 mm时,径向和周向残余应力最大值均较大,这是因为在此条件下,焊接线能量大,此区域受热传热复杂的缘故。②起始位置(0°)与其他位置的在焊缝两侧残余应力分布状况差别较大,这主要是由于焊接起始位置经过二次加热。③远离焊缝的齿轮边缘是焊件最后冷却的区域,故此位置焊缝两侧的最大值和最小值差别较小。④对于径向残余应力,近焊缝处为压应力,远离焊缝的齿圈边缘为拉应力;且压应力的最大值并不在焊缝中线上,而是出现在焊接线内侧,距离焊缝中线2 mm处的位置,这是由于双联齿轮本身结构的特殊性所致。⑤对于周向残余应力,其应力分布状况沿焊缝中心线对称分布,这种对称分布使齿轮整体轴向应力较小,变形小;焊缝中心位置为一个较小的应力值,在热输入较小时这个较小值接近于0;从焊缝中线向两侧,应力值逐渐增大,为拉应力,在距焊缝中线约2 mm处达到峰值,随后应力值逐渐减小,在齿圈边缘处为压应力。

本文模拟结果与文献[8]中讲到的封闭焊接残余应力的分布趋势也基本一致。残余应力的分布情况与日本增渊兴一著的焊接结构分析中实验所得

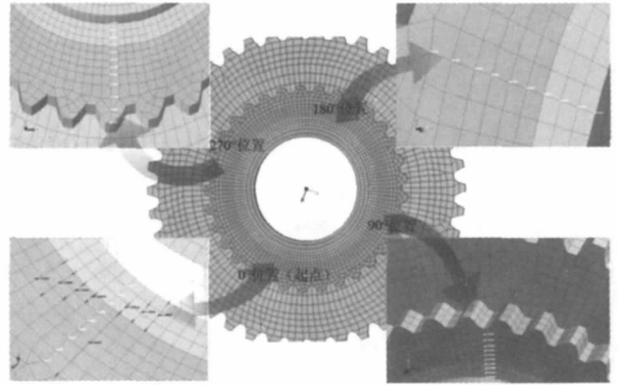


图4 焊接残余应力分布曲线的取样位置示意图  
Fig.4 Schematic diagram of sampling points for welding residual stresses

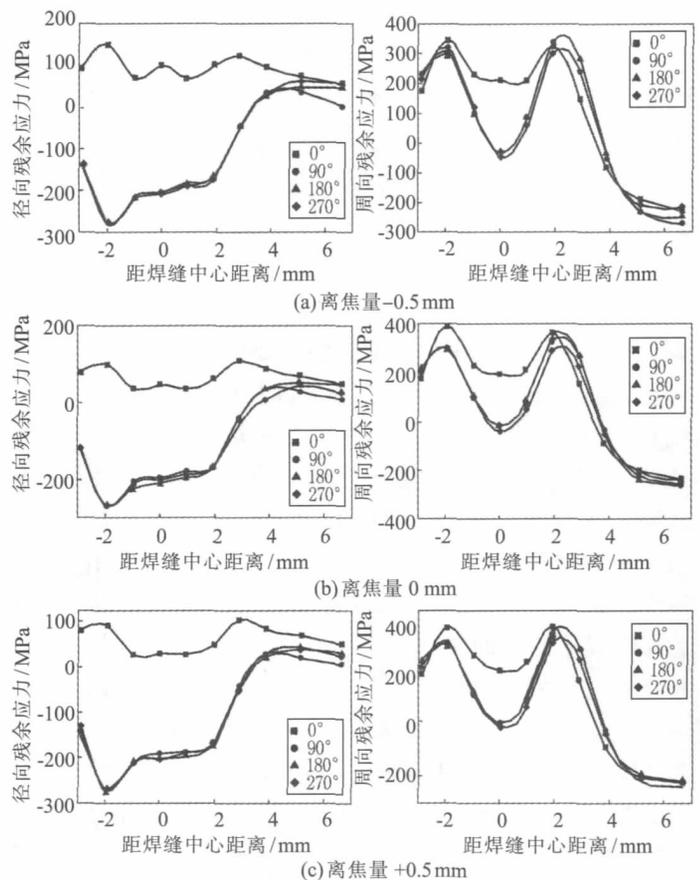


图5 不同离焦量下残余应力分布

Fig.5 Residual stress distribution under different defocusing amount  
残余应力的分布趋势十分相似<sup>[9]</sup>。因此可以认为,本研究中应力场分布的模拟结果与试(下转第190页)

陷部位 (在此之前还能观察到其他缺陷本文不予讨论), 观察图像可明显看到缺陷位于焊缝根部, 由扫描图像可以直接由分析软件测量出缺陷高度和长度, 不过缺陷的定性存在一定难度。图 4 的相控阵扫描图像中, 无论是俯视图、侧视图还是扇形扫描图, 均能明显观察到缺陷的存在, 对比各种扫描成像图结合相控阵扫描中的动态 A 波波形变化, 可以准确的判断缺陷性质为未焊透, 同时参考成像的热度图或灰度图可直观判断缺陷当量大小, 数值测量上也十分方便: 俯视图可测量出缺陷长度; 侧视图可测量缺陷高度, 扇形扫描图可以看到模拟焊缝图中缺陷的具体位置, 此外在三维成像图中还可以直观的看到“真实”的缺陷形态。以上四种无损检测方法测量数据见表 2。

表 2 不同检测方法测量数据

Tab.2 Measurement data of different testing methods

	RT	UT	TOFD	相控阵
定性	未焊透	未焊透	根部缺陷	未焊透
长度/mm	20.5	20.0	18.9	20.2
高度/mm	-	-	5.5	5.7
深度/mm	-	24.7	27.2	26.9

由上分析可以看出, TOFD 和相控阵不仅能直观的显示缺陷图像, 而且在缺陷的定位和定量测量中也有着 RT 和 UT 不可比拟的优势地位, 测量方法简单, 测量结果可靠、可信。对于 RT 和超声存在的漏检和误判等问题, TOFD 和相控阵也能解决和 (上接第 187 页) 验及理论分析是基本一致的, 模拟结果具有一定的可信度。

### 4 结论

(1) 不同离焦量条件下的残余应力具有相同的分布趋势, 应力值差别不大, 其中离焦量为 -0.5 mm 时, 焊接线能量最大, 导致径向和周向残余应力最大值均较大。

(2) 由于焊接起始位置经过二次加热; 起始位置(0°)与其他位置的在焊缝两侧残余应力分布状况差别较大。

(3) 远离焊缝的齿轮边缘是焊件最后冷却的区域, 故此位置焊缝两侧残余应力的最大值和最小值差别较小。

#### 参考文献:

[1] Rai R, Debroy T. Tailoring weld geometry during keyhole mode laser welding using a genetic algorithm and a heat transfer model[J]. Appl. Phys., 2006, 39:1257-1266.

补充。当然它们也有着各自的局限性, 就本文所检测的未焊透而言, 前者由于下表面的反射信号较强在很大程度上淹没了缺陷衍射信号, 使得缺陷成像不明显; 后者对温度敏感性比较高, 设置的焊缝规格参数对测量结果有较大影响。

### 3 结论

(1) 对于管道焊接接头存在的缺陷, 根据缺陷位置、性质以及管道规格选取合适的检测方法很有必要。

(2) 需要精确定位、定量的缺陷, TOFD 和相控阵方法相比于传统的射线和超声 A 波更为有效和准确。

(3) TOFD 和相控阵检验结果克服了一些人为因素干扰, 数据更易分析和存储, 检验结果更为可信。

#### 参考文献:

[1] 熊亮. 厚壁大径管对接焊缝根部缺陷的一纵一横双探头超声衍射法定性定量检测[J]. 无损检测, 2008, 30(6):30-34.  
 [2] 许维普. 射线检测线性缺陷认定 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(5): 104-105.  
 [3] 张践新, 刘青岩, 朱涛, 等. 管道对接焊缝未焊透自身高度黑度补偿测定方法研究[J]. 无损检测, 2000, 22(10):451-453.  
 [4] 刘晴岩, 张践新. 管道对接焊缝未焊透自身高度超声测定方法研究[J]. 无损探伤, 2002, (2):12-14. [H]  
 [2] Leggatt H. Residual stresses in welded structures [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85: 144-151.  
 [3] DENG Dean, Murakawa H, Liang W, Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe [J]. Computational Materials Science, 2008, 42(2):234-244.  
 [4] 汪苏, 张瑛莉, 蔡玲玲, 等. 航空发动机加力燃烧室扩散器外壁环缝焊接模拟[J]. 热加工工艺, 2006, 35(23):82-84.  
 [5] Ogawa K, Deng D, Kiyoshima S, et al. Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment [J]. Comput Mater Sci., 2009, 45:1031-1042.  
 [6] Kiyoshima S. Quick welder user's manual [M]. Tokyo: Research Center of Computational Mechanics Inc, 2005.  
 [7] Kiyoshima S, DENG Dean, Ogawa K, et al. Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint [J]. Comput Mater Sci., 2009, 46: 987-995.  
 [8] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.  
 [9] 增渊兴一. 张伟昌译. 焊接结构分析[M]. 北京:机械工业出版社, 1985. [H]