

文章编号: 1000-5862(2017)05-0447-07

# 不锈钢薄板大功率激光点焊温度与应力特性研究

陈翔宇, 简弃非\*

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 以0.5 mm厚的304不锈钢薄板为研究对象, 采用热-结构间接耦合法, 获取其在3 000 W功率光纤激光器点焊加工过程中温度场和应力场的分布特点及变化特性. 在温度场模拟过程中采用修正的锥形热源模型, 并将模拟得到的焊点形状与实验得到的形状进行对比. 结果显示: 运用该修正热源模型得到的温度场分布特点与实际加工过程相吻合; 模拟得到熔池的凝固速度均在 $4\,000\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 属于远离平衡态的快速凝固; 在焊接过程中, 计算域的最大等效应力均分布在夹具位置, 且在熔池周围出现环状的高应力区.

**关键词:** 激光焊接; 有限元分析法; 304 不锈钢

**中图分类号:** TK 6      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.05.02

## 0 引言

由于激光焊接加工过程中加热不均匀、热循环温度变化范围大等原因<sup>[1-2]</sup>, 焊后必然伴随着焊接残余应力和变形的产生, 进而会导致焊接接头疲劳断裂<sup>[3]</sup>、应力腐蚀破坏及降低结构的稳定性<sup>[4-5]</sup>. 通过数值模拟的方法<sup>[6]</sup>, 可以有效预测其热应力场和焊接变形, 为实际焊接参数的选择提供参考.

目前, 普遍采用有限元分析法进行激光焊接的热应力模拟分析, 为了弥补有限元法对流体流动模拟的不足, 通常会忽略熔池的内部流动并使用热源模型代替母材对激光束能量的吸收. 在大功率激光直线焊接过程中, 除了加工开始的匙孔形成阶段外, 随着工件相对于光束的移动, 匙孔在材料中移动并保持稳定<sup>[7]</sup>. 因而直接使用适合的体热源模型对该过程进行模拟并不会造成太大的误差. 然而对于大功率激光连续点焊接, 每一个点焊均会经历熔池和匙孔的生长过程, 因此常规的体热源已经无法适用于该过程的热应力模拟, 需要对热源模型进行修正.

本文以0.5 mm厚的304不锈钢薄板为研究对象, 采用热-结构间接耦合法来获取其在3 000 W功率光纤激光器点焊加工过程中温度场和应力场的分

布特点及变化特性. 在温度场模拟的过程中采用修正的锥形热源模型, 并将模拟得到的焊点形状与实验得到的形状进行对比, 验证对锥形热源模型修正的可行性.

## 1 激光器工作参数与焊点金相分析

本次实验采用光纤激光器进行点焊加工, 其工作参数如表1所示. 激光源在2 ms内线性升高到峰值功率开始加热, 持续加热31 ms, 然后在2 ms内线性降低到0 W. 加工工件为2片0.5 mm厚的304不锈钢薄板. 焊点如图1(a)所示.

表1 激光器工作参数

功率/W	焦点直径/mm	脉冲宽度/ms	离焦量/mm	焦距/mm
3 000	0.4	35	0	110

由于焊点较小, 受力易变形、破坏, 所以要求较高的加工精度以及较小的加工剪切力. 本实验采用DK7740线切割机床对焊接板片进行切割, 而后进行镶样、打磨、抛光以及王水腐蚀处理, 得到待观测试样(见图1(b)). 最后用DMI5000倒置金相显微镜观察焊点的形状(见图1(c))以及焊点内部的金相组织(见图1(d)).

可见焊件已被焊透, 且在上、下表面出现小凹

收稿日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(21776095), 广州市产学研协同创新重大专项(201508010045)和广东省产学研合作(2016B090918034)资助项目.

通信作者: 简弃非(1963-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事动力机械、新能源等方向的研究. E-mail: tejqf@scut.edu.cn.

坑,这是由于部分母材蒸发飘散以及蒸气射流引起的金属溶液飞溅造成的.焊点形貌为“钉”头形,由此可以判断出焊接过程中并未出现穿透焊件的匙孔,其熔池流动形式如图2所示.这种熔池流动会造成

中部较窄、底部稍宽、开口处最宽的熔池形状<sup>[8]</sup>.观察焊点内部的金相组织(见图1(d))可以初步判断其是以含有铁素体的胞状奥氏体为主.

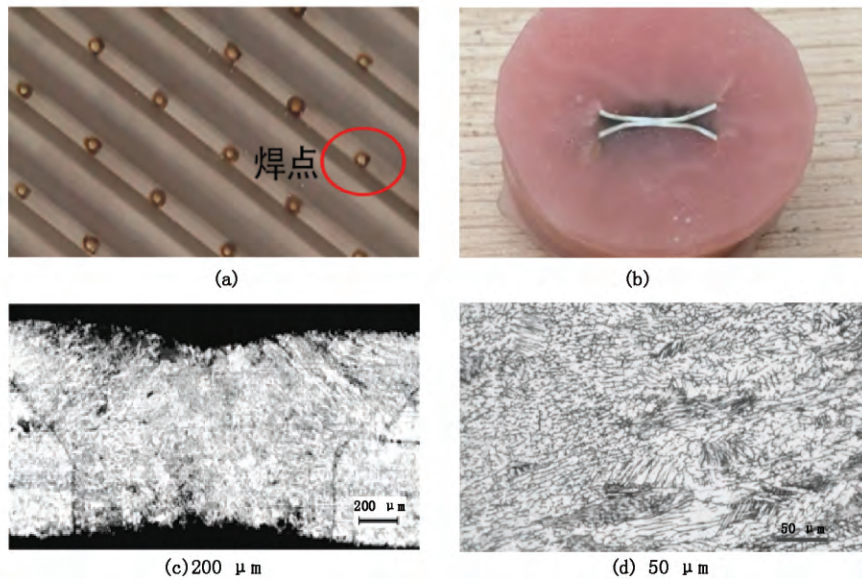


图1 实验焊点形状

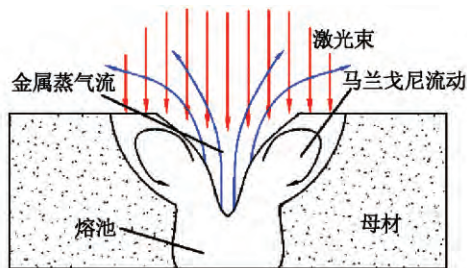


图2 熔池流动形式

## 2 激光热源模型的修正

本文采用锥形体热源模型<sup>[9]</sup>(见图3),并根据工件表面对激光束能量的吸收过程以及熔池流动对熔池形状的影响将其进行修正.表达式如下:

$$\begin{cases} Q = \frac{9\eta\xi P}{\pi(1-e^{-3})} \cdot \frac{1}{h(t)(r_e^2 + r_e r_i(t) + r_i(t)^2)} \cdot \exp(-3r^2/(ar_c)^2), \\ r_c = r_e - \frac{(r_e - r_i(t))}{h(t)} |z|, \end{cases} \quad (1)$$

(1) 式中  $Q$  为热生成率(W);  $P$  为激光器功率(W);  $\eta$  为母材吸收效率;  $\xi$  为激光器效率,取0.8;  $r_c$  是不同深度  $z$  对应横截面半径(m);  $r_e$ 、 $r_i(t)$  是热源上下表面圆的半径(m);  $h(t)$  为热源高度(m);  $a$  为忽略熔池流动引进的修正系数.

当焊接开始时  $h(t)$  取值为焊接表面第1层有

限元单元的厚度,  $\eta$  取0.31<sup>[10]</sup>.待母材开始出现蒸发后  $h(t)$  线性增加到焊接板片的厚度,  $\eta$  线性增加到1.00,以模拟熔池向下迁移的过程.修正系数  $a$  需要根据具体熔池流动所造成的影响来取值,本文取值为

$$a = 0.5 + |z + 0.6| / \left[ 0.4 + \frac{\max(z + 0.6, 0)}{z + 0.6} \times 0.2 \right].$$

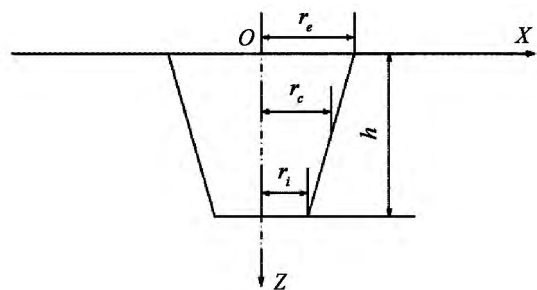


图3 锥形体热源模型

## 3 有限元模型的建立

### 3.1 材料属性

实验的材料为304不锈钢,其常温下的物性参数如表2所示<sup>[11-14]</sup>.

3.2 计算域模型

所采用的激光锥形热源模型为对称结构,为了节省计算时间,模拟中取热源的一半进行分析,如图 4(a)所示,该计算域模型为 2 片紧密贴合在一起的单片厚度为 0.5 mm 的 304 不锈钢板片,取激光光斑圆心为坐标原点,模拟计算域尺寸为 3 mm × 6 mm × 1 mm. 网格划分如图 4(b)所示,由于模拟涉及到相变,为了加快收敛,选用低阶热单元 solid70 以及对应结构单元 solid185 进行分析.

表 2 304 不锈钢物性参数

物性参数	数值	物性参数	数值
固相温度/K	1 633.15	标准焓 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1})$	$2.8 \times 10^8$
液相温度/K	1 727.15	辐射系数	0.25
沸点/K	3 073.15	蒸发潜热 $/(J \cdot kg^{-1})$	$7.6 \times 10^6$
熔化潜热 $/(J \cdot kg^{-1})$	$2.61 \times 10^5$	热膨胀系数 $/K^{-1}$	$21.2 \times 10^{-6}$
蒸发潜热 $/(J \cdot kg^{-1})$	$7.6 \times 10^6$	泊松比	0.3

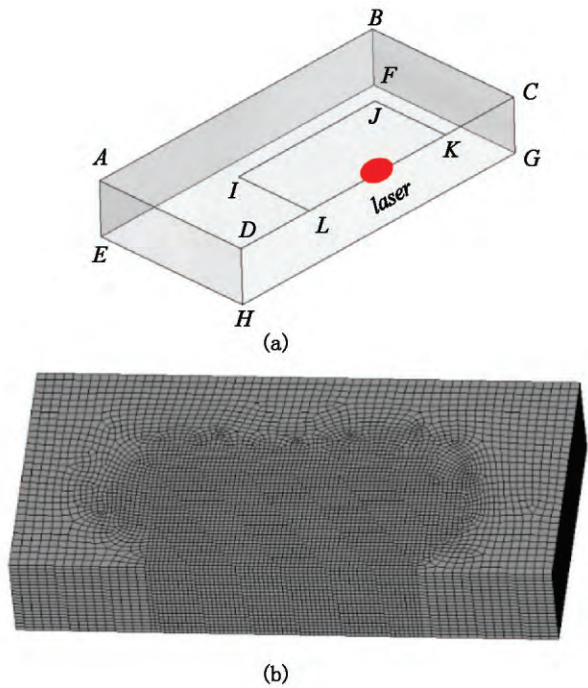


图 4 计算域模型

3.3 边界条件确定与处理

- 本文对物理模型进行如下简化处理:
- 1) 忽略熔池流动;
  - 2) 将焊接表面视为灰体,并忽略焊接过程中流体内部的辐射效应;
  - 3) 忽略焊接过程中工件附近环境温度的变化,并假定工件表面与环境的对流换热为自然对流;

4) 设 304 不锈钢的熔沸点为定值.

边界条件按照图 4(a)所示区域进行设置(见表 3) 激光焊接过程中,由于匙孔上方附近弥漫着金属蒸气,会对熔池形状造成影响<sup>[15]</sup>,因此面 IJKL 辐射和对流的参考温度为材料的沸点 3 073.15 K,取强制对流换热系数为  $26 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ;其余面辐射和对流的参考温度为环境温度 300 K,取自然对流换热系数为  $10 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

表 3 边界条件设置

计算面区域	边界条件	计算面区域	边界条件
面 ABCD	辐射和自然对流	面 ABFE	辐射和自然对流
面 BCGF	辐射和自然对流	面 CDHG	辐射和自然对流
面 ADHE	辐射和自然对流	面 EFGH	辐射和自然对流
面 IJKL	辐射和强制对流	laser	锥形热源模型

在激光焊点熔池温度场模拟过程中,将温度控制在沸点以下,防止部分区域温度过高影响模拟结果.在热应力分析过程中,控制熔池内部处于零应力和零应变状态.

4 仿真结果分析与讨论

4.1 温度场

取图 4(a)中截面 CDHG 为研究对象,其温度场随时间的变化如图 5 所示.图中灰色区域为熔池,彩色区域为热影响区.在焊接开始阶段(见图 5(a)),从开始到 6 ms 热能主要以导热形式从表面向内部传递,熔池的形状为半椭球体;从第 7 ms 开始母材出现蒸发,匙孔开始出现,熔池向下生长,到 22 ms 时母材被焊透,即熔池向下生长的时间段为 7 ~ 22 ms,图 5(b)为在 16 ms 时的熔池形状;22 ms 之后熔池的底部向四周生长,到 35 ms 时熔池生长到最大,此时焊接结束.图 5(c)和图 5(d)分别为在 24 ms 和 35 ms 时的熔池形状.可见,模拟的熔池生长过程符合母材对激光能量的吸收过程.

为了更好地研究熔池的温度变化情况,在截面 CDHG 的中轴线上均匀取点 1、2、3、4、5 以及 2 板片的结合线上每相距 0.4 mm 分别取点 6、7、8 进行分析(见图 5(d)).它们的温度随时间变化曲线如图 6 所示.在 0 s 时,焊接表面的点 1 开始受热升温,随着热能向下传递,下方点的温度先后开始升高,且升温特别迅速.在同一深度的点 3、6、7、8 几乎同时开始加热,它们所能达到的温度与半径成反比,点 3、6、7 的最高温度均达到熔点以上,属于焊点内部,而点 8 的最高温度在熔点以下,属于热影响区.节点

1、2、3 的最高温度均达到沸点以上,而点 4、5 在沸点以下,即没有出现穿透焊件的匙孔。

在焊接结束之后,母材的冷却速度相当迅速,在 0.12 s 左右熔池已完全凝固。轴线上各点在液相线和固相线之间的凝固速度均达到  $10^4 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,处于熔池边缘的点 7 的凝固速度也达到  $4\,000 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,属于快速凝固( $>1\,000 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ),因此可

推断出焊后的组织以胞状奥氏体为主,并含有铁素体<sup>[16-17]</sup>。这与实验得到的结果(见图 1(d))吻合。经过 1.2 s 左右,整个计算区域的温度均为 600 K 左右,区域最大温度差在 20 K 以下。之后冷却速度十分缓慢,在 600 s 左右才冷却到室温。

图 7 为实验得到焊点的形状、统计平均尺寸与模拟焊点的对比图。

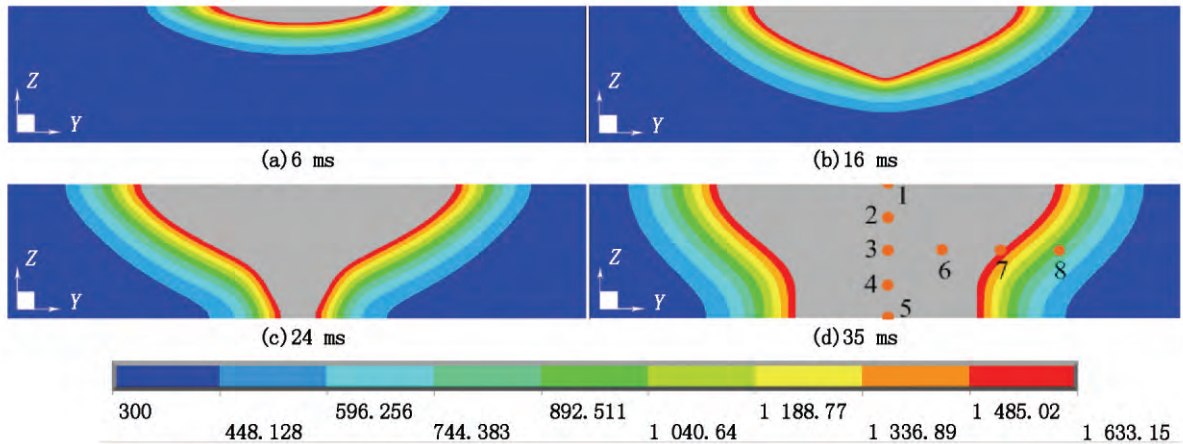


图 5 熔池生长过程(标尺单位: K)

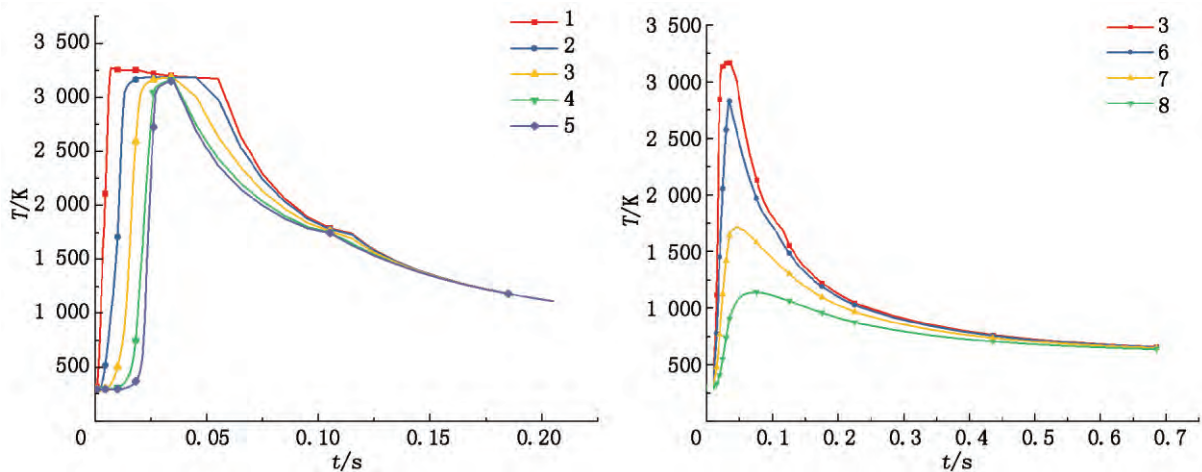


图 6 节点温度随时间变化曲线

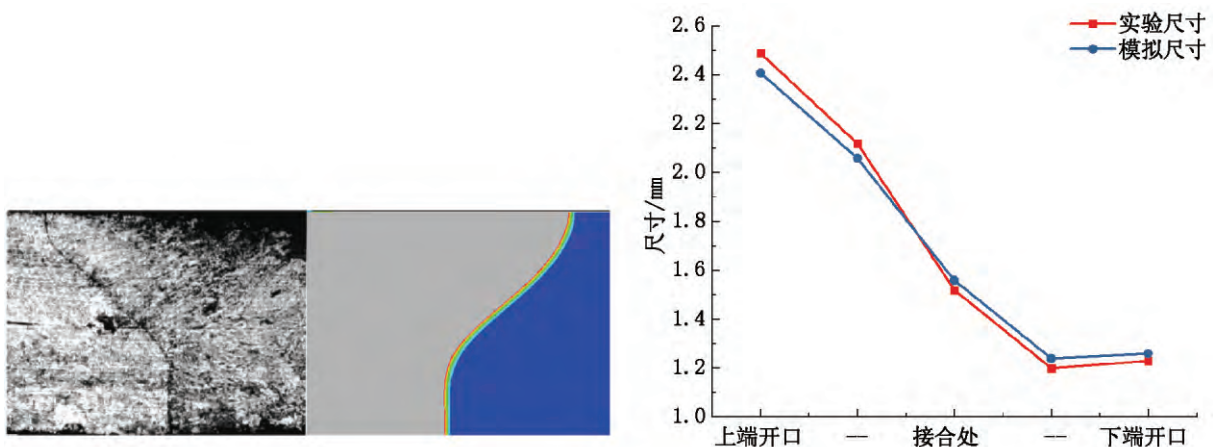


图 7 熔池形状对比

可见 2 者的形状有较高的相似度,尺寸的最大偏差位置在上端开口处,分别为 2.48 mm 和 2.38 mm,最大偏差为 3.8%。但未能在焊点表面模拟出因材料散失而造成的小凹坑。

经以上分析可以得出,模拟的温度场具有较高的准确度。

## 4.2 应力场

夹具夹在面  $ABFE$  处,假设其为刚性,对板片的约束可以转化为如下位移约束:面  $ABFE$  在  $X$  轴方向 0 位移,线  $AB$ 、 $FE$  在  $Y$ 、 $Z$  轴方向 0 位移。等效应力场随时间的变化如图 8 所示。在焊接过程中(如图 8(a)、8(b)),由于材料受热膨胀,大部分区域的应力为压应力,最大等效应力分布在夹具位置,数值在 230 MPa 左右。同时,在熔池周围出现环状的高应力区,数值在 180 MPa 左右,这是由于熔池周围的高

温区域(非熔融区)受热膨胀进而对较远处的低温区域挤压造成的。对比 304 不锈钢的屈服极限(常温为 206 MPa,温度在 800℃ 时为 69 MPa),可以发现熔池周围区域的等效应力均大于屈服极限而出现塑性变形。在冷却的开始阶段(如图 8(c)),由于热影响区的扩大以及夹具的限制,高应力区逐渐以焊点为中心向外扩散,此时大部分区域的应力仍为压应力。而熔池周围由于冷却收缩,使该区域的压应力逐渐减小。0.1 s 之后,热影响区已扩散到整个计算域,且整个计算域都开始冷却收缩,使得压应力逐渐减小并向拉应力转变,在这过程中等效应力先逐渐变小后逐渐升高,最低值为 130 MPa 左右,同时由于计算域尺寸较小,整个计算域的等效应力逐渐趋于相等。到 600 s 时整个计算域已冷却到室温,此时的应力分布便为残余应力。

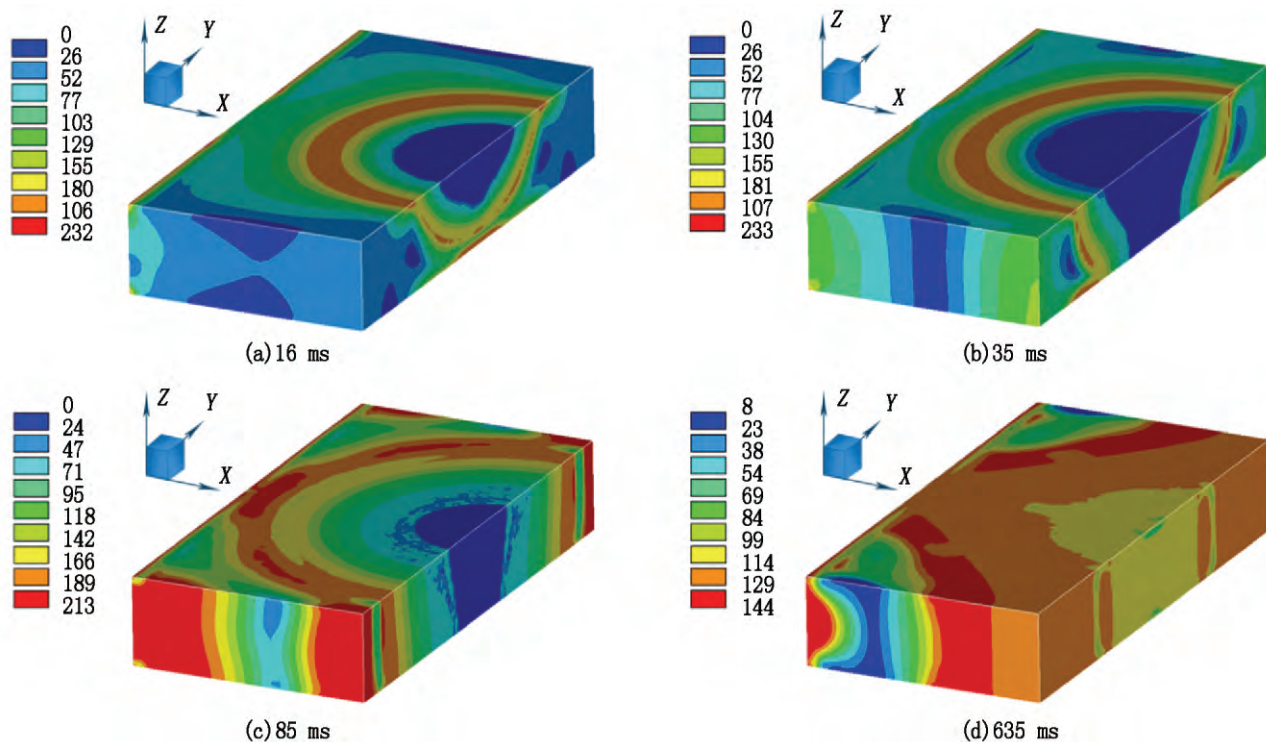


图8 等效应力随时间变化(标尺单位: Mpa)

残余应力场分布如图 9 所示,图 9(b)、9(c)、9(d) 中标尺负值表示压应力,正值表示拉应力。可见,大部分区域的等效应力均在 200 MPa 左右。夹具附近的小范围区域在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向均为压应力,3 个方向的压应力相互平衡抵消,导致该区域的等效应力较低。焊点表面在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向均出现较大的拉应力集中区,这是由于该表面在凝固过程中出现变形

造成的,3 个方向的拉应力相互平衡抵消,最终导致其等效应力在 200 MPa 左右。在  $X$  轴方向,几乎整个计算域均为拉应力,数值在 100 MPa 到 300 MPa 之间,焊点和夹具之间的中部地带应力值相对较低。 $Y$  轴和  $Z$  轴方向的应力分布基本相似,焊点和夹具之间的中部地带为压应力,且在 60 MPa 以下,在 2 端区域为拉应力,数值在 90 MPa 以下。

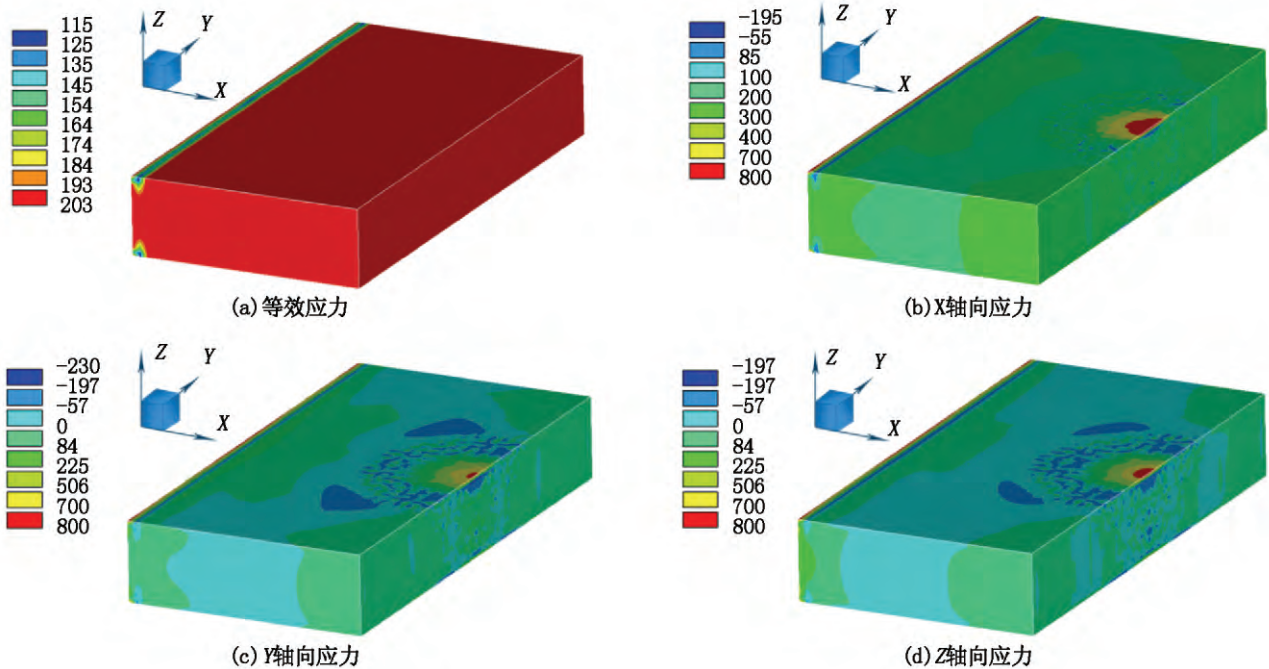
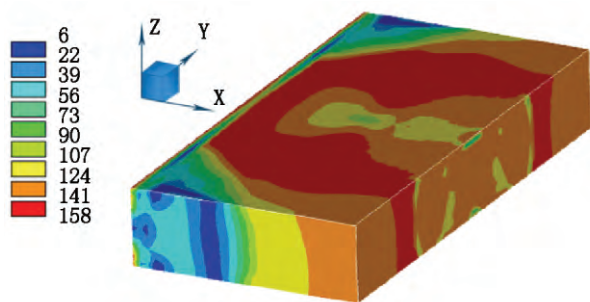


图9 残余应力云图(标尺单位: Mpa)

在点焊接结束的 1 s 后撤去夹具对板片的约束进行模拟,得到的残余等效应力分布如图 10 所示.可见,由于少了夹具的约束,整个计算域的残余等效应力不再趋于相等,且数值较低,最大值为 158 MPa,是不撤去夹具的最大等效应力的 78%. 因此焊接结束后尽快取下夹具有利于减少焊接板片的残余应力.

图10 撤去夹具模拟的残余等效应力云图  
(标尺单位: Mpa)

## 5 结论

本文采用热-结构间接耦合的方法,对 304 不锈钢薄板激光点焊过程的温度场和应力场进行模拟分析.在温度场的模拟中采用修正的锥形热源模型.模拟结果显示:

- 1) 运用该修正热源模拟得到的温度场分布特点与实际加工过程相吻合,具有较高的准确度;
- 2) 模拟分析得到,整个熔池的凝固速度均在  $4\,000\text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,属于远离平衡态的快速凝固;

3) 在焊接过程中,计算域的最大等效应力均分布在夹具位置,且在熔池周围出现环状的高应力区,数值达到材料的屈服极限以上.

## 6 参考文献

- [1] 侯培红. 激光点焊薄硅钢片的工艺研究 [J]. 焊接技术, 2017, 46(2): 43-46.
- [2] 全玉强. 硅钢片与不锈钢间的激光点焊工艺 [J]. 电机技术, 2017(1): 46-49.
- [3] 刘毅. 薄板不锈钢与铝合金激光点焊工艺及裂纹形成机理研究 [J]. 应用激光, 2016, 36(1): 46-52.
- [4] 李菊. 钛合金低应力无变形焊接过程机理研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2004.
- [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] 王凌云, 王宏, 张翔. 熔池金属回流激光焊接小孔过程模拟 [J]. 电焊机, 2013, 43(10): 22-27.
- [7] 陈磊. 大功率激光焊接熔池特性数值模拟 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- [8] 杜汉斌. 钛合金激光焊接及其熔池流动场数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [9] 胡宝. TC4 钛合金薄壁件激光焊接数值模拟研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [10] Duley W W. Laser welding [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998: 69.
- [11] 干勇, 田志凌, 董瀚, 等. 中国材料工程大典(第2卷) - 钢铁材料工程(上) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

- [12] Mills K C. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys [M]. Cambridge: Woodhead Publication Limited 2002.
- [13] Roderick I L G, Takamichi I. 液态金属的物理 [M]. 冼爱平, 王连文, 译. 北京: 科学出版社 2006.
- [14] 王厚勤, 张秉刚, 王廷 等. 电子束定点焊接 304 不锈钢熔池流动行为数值模拟 [J]. 焊接学报, 2016, 37(3): 57-61.
- [15] Wonk C, SuckJoo N, Claus T, et al. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 262-275.
- [16] 申丽娟, 邢淑清, 麻永林 等. 304 奥氏体不锈钢亚快速凝固组织演化和形成机理 [J]. 特殊钢, 2012, 33(4): 53-56.
- [17] 沈显峰, 黄文荣, 滕文华. 辅助增强匙孔气流对激光焊接不锈钢组织和显微硬度的影响 [J]. 焊接学报, 2013, 34(4): 19-23.

## The Analysis on Temperature and Stress Characteristics of Stainless Steel Sheet Under High Power Laser Spot Welding

CHEN Xiangyu, JIAN Qifei\*

(College of Mechanical and Automobile Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** The 304 stainless steel sheet with 0.5 mm thickness is set as the research object. Thermo-structural indirect coupling method is used to obtain its distribution and variation characteristics of temperature field and stress field during the spot welding process of 3 000 W power fiber laser. In the temperature field simulation process, the modified cone-shaped heat source model is adopted, and the simulated solder joint shape is compared with another that obtained by the experiment under the same conditions. The results show that the temperature field distribution obtained by using the modified heat source is consistent with the actual process. According to the result of simulation, the solidification rate of the molten pool is above  $4\,000\text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ , which belongs to rapid solidification that is far from equilibrium. During the whole welding process, the maximum Von Mises stress of the calculated domain is distributed in the clamp position, and around the molten pool, the high stress zone appears.

**Key words:** laser welding; finite element analysis; 304 stainless steel

(责任编辑: 王金莲)