

文章编号: 1000-5862(2018)04-0348-06

# 不锈钢薄板激光直缝焊过程的数值模拟与分析

赵 晶, 曹颂阳, 简弃非\*, 肖金平

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广东 广州 510640)

摘要: 以 304 不锈钢薄板为研究对象, 从流体力学与传热过程的角度建立了激光直缝焊瞬态行为的物理模型, 并对其整个过程的温度和应力场变化进行了可视化分析. 结果表明: 在激光焊功率为 3 000 W 情况下, 当焊接速度为  $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 峰值温度最高达 2 500 K 以上, 起焊距离短, 只有 0.81 mm.

关键词: 激光焊接; 瞬态行为; 数值模拟; 可视化分析

中图分类号: TG 456.7 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2018.04.04

## 0 引言

激光焊接是一种利用高能量密度的激光束作为热源的高效、精密的焊接方法, 具有功率密度大、焊接效率高、热影响区窄、精度高、热变形小等特点, 因此在加工制造、航空航天、粉末冶金、汽车工业、电子工业等领域得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>.

目前关于激光焊的研究主要从实验测试<sup>[4-9]</sup>和数值模拟<sup>[10-15]</sup>2 方面进行. 在实验测试方面, 伍强等<sup>[4]</sup>对 1.5 mm 厚的高强度双面镀锌钢板进行了  $\text{CO}_2$  激光焊接实验, 研究了激光焊接的微观组织和机械性能特点, 并结合理论分析, 得到了在一定条件下焊接功率与焊接速度、焦点位置等参数的关系. A. Ascari 等<sup>[5]</sup>对混合激光-gma 焊进行了实验研究, 利用图像分析软件对熔区内的气孔进行了观察和测量, 以了解工艺参数与孔隙率形成之间的可能相关性. 李时春<sup>[6]</sup>对高功率万瓦级别的厚板片的焊接问题进行了深入研究, 通过激光束倾斜照射实验, 研究了激光器的移动速度、热流密度与熔液表面波动的关系. 在数值模拟方面, 周永涛等<sup>[11]</sup>以低碳钢为研究对象, 采用了带锥形的高斯 3 维移动热源对激光焊接过程温度场进行动态模拟, 并对模拟的温度场进行了相关分析. M. Turňa 等<sup>[14]</sup>利用 ANSYS 软件模拟了 304 不锈钢的圆管激光焊接过程, 并得到了焊接过程中的温度以及应力分布情况.

由于激光焊接过程复杂, 成本较高, 本文将以 304 不锈钢薄板为研究对象, 通过实际工况及测试样的参数建立相应的物理模型, 然后利用数值模拟软件 workbench 从流体力学的角度来分析激光直缝焊的瞬态行为, 并重点分析直缝焊的温度场、应力场等动态过程, 为后续改善激光直缝焊性能提供参考.

## 1 激光直缝焊模型

### 1.1 计算模型的建立

图 1 是本文基于数值模拟和分析的对象, 即采用激光焊接的波纹板片. 该波纹板片是某换热器中的基本换热单元, 波纹板片只有 0.5 mm 厚度. 图 2 是激光直缝焊过程示意图.

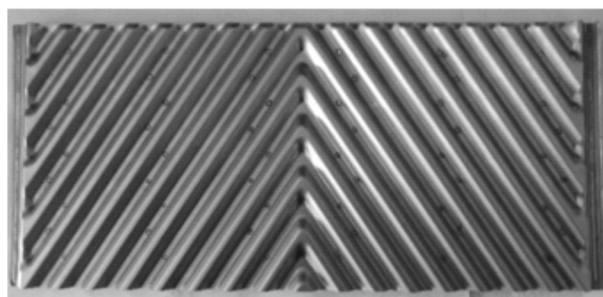


图 1 激光直缝焊的波纹板片

直缝焊是本文主要研究对象, 为了更好地研究直缝焊接过程, 需要对波纹板直缝焊处进行局部网格加密. 图 3 是建立的直缝焊 3 维模型, 几何模型外形尺寸为  $37.5 \text{ mm} \times 86.4 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$ . 图 4 是

收稿日期: 2018-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(21776095)和广州市科学研究(201804020048)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, 主要从事传热节能与新能源装备研究. E-mail: tcjqf@scut.edu.cn

直缝焊局部网格加密示意图, 总共有 63 万网格, 101 万节点, 网格质量在 0.61 以上。

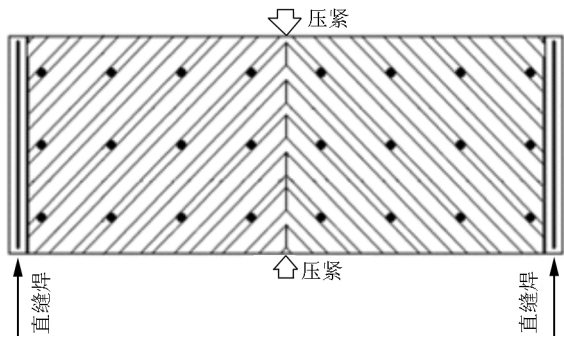


图 2 直缝焊过程示意图

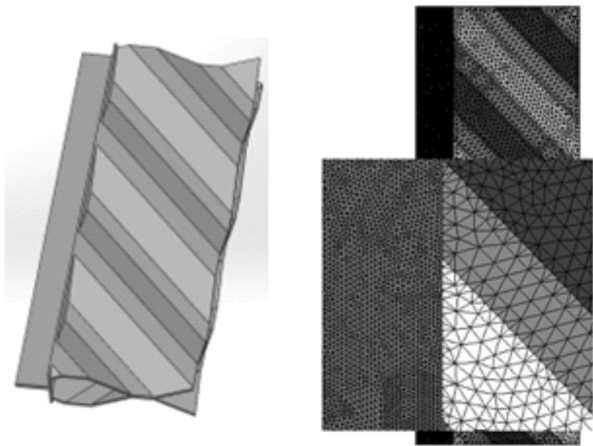


图 3 直缝焊 3 维模型

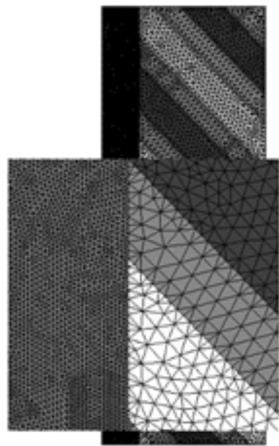


图 4 直缝焊网格局部加密示意图

1.2 热源模型

因为波纹板片为薄板, 选择旋转高斯移动体热源就可满足焊接要求. 该热源模型在直角坐标系的表达式可用下列数学式表示:

$$S_{Laser} = q_0 \exp\left(\frac{-3s_h}{\log(H(t)/z)} r^2(t)\right),$$

其中  $r^2(t) = x^2 + y^2$ , 考虑到金属蒸气对热源的影响, 本文的  $r(t)$  通过追踪小孔开口宽度的变化实时调整.  $q_0(z, t)$  为  $z$  轴上的热流密度,  $s_h$  为热源形状系数,  $H(t)$  为热源的高度.

$$s_h = 3/R_0^2,$$

其中  $R_0$  为热源开口半径,  $s_h$  越大说明热流密度越集中.

$$q_0 = Q(t) \frac{3s_h}{\pi H(1 - 1/e^3)},$$

其中  $Q(t)$  为激光器功率,  $H(t)$  表示热源向下的迁移距离, 本文的  $H(t)$  通过追踪小孔深度的变化实时调整. 直缝焊加工平台为 3 000 W 级光纤激光器, 焦距为 220 mm, 聚焦的光斑直径为 0.8 mm, 离焦量为

0 mm. 直缝焊焊接距离为 82.4 mm, 焊接环境温度为 300 K. 具体参数如表 1 所示.

表 1 304 不锈钢热物性参数

物性参数	数量值
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 850
固相温度/K	1 633.15
液相温度/K	1 727.15
沸点/K	3 073.15
标准焓/(J·kg <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> )	2.8×10 <sup>8</sup>
熔化潜热/(J·kg <sup>-1</sup> )	2.61×10 <sup>5</sup>
热膨胀系数/K <sup>-1</sup>	21.2×10 <sup>-6</sup>
换热系数(空气)/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	10
辐射系数	0.25
Stefan-Boltzman 常数/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>4</sup> )	5.67×10 <sup>-8</sup>
蒸发潜热/(J·kg <sup>-1</sup> )	7.6×10 <sup>6</sup>

1.3 边界条件

设置初始边界温度为环境温度, 即室温 27 ℃. 在焊接过程中, 波纹板温度与周围环境温度存在巨大的温差, 主要以热对流和热辐射形式与周围进行热质交换.

设置对流边界的对流值, 即

$$q_{w1}(t, x, y, z) = h(T_f - T_w),$$

设置边界辐射值, 即

$$q_{w2}(t, x, y, z) = \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_w^4),$$

其中  $T_w$  为壁面温度,  $q_{w1}$ ,  $q_{w2}$  为壁面的热流密度,  $h$  为壁面对流换热系数,  $\varepsilon$  为物体表面的发射率,  $\sigma$  为斯特藩-玻尔兹曼常数.

2 结果及分析

2.1 温度场分析

图 5 是直缝焊数值模拟在热源移动速度为 75 mm·s<sup>-1</sup> 时, 不同时刻的温度场云图. 在  $t=0.3$  s 时, 熔池内的高温 2 353.6 K, 已超过波纹板熔点, 在  $t=0.6 \sim 0.9$  s 时, 熔池内最高温度相差不大, 基本达到稳定状态. 从  $t=0.3$  s 的 2 353.6 K 上升到  $t=0.9$  s 的 2 534.4 K 可以看出, 焊接过程从开始起焊的不稳定状态逐渐过渡到稳定状态. 在  $t=1.2$  s 时, 焊接已结束, 图 5(d) 为波纹板冷却一段时间温度场云图分布. 整个焊接过程, 温度场分布以焊点为中心带着长长的尾迹向前移动.

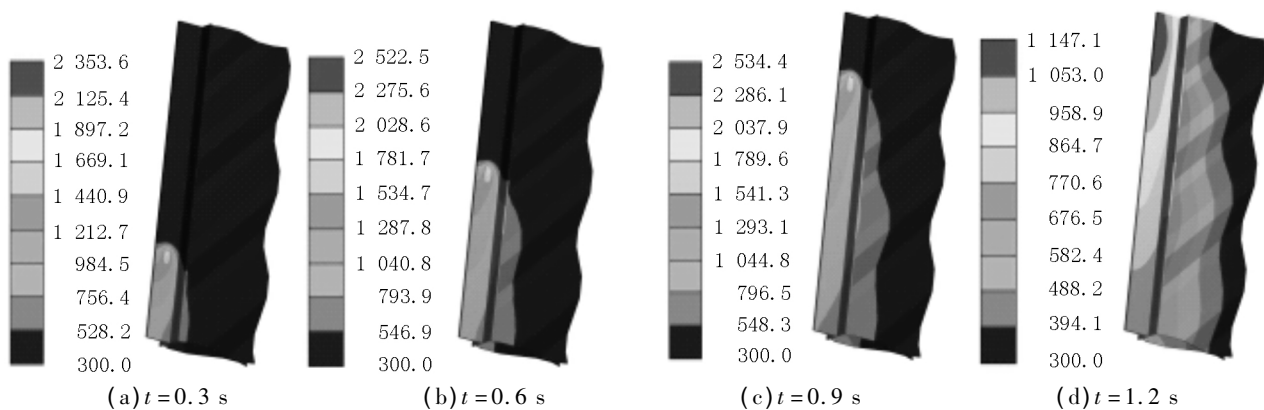


图5 直缝焊温度场(单位: K)

在实际焊接过程中,同一个激光源不同的焊接速度对焊接性能也有重大影响,下面对  $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $75 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  3 种不同焊接速度的焊接过程进行对比分析. 选取一组 A 到 K 点作为研究对象,如图 6 分布,对其进行热循环分析. 其中,水平方向上 A、G 为焊缝延线板片的 2 个端点, B、F 为焊接的起点和终点,而 C、D、E 为相隔 20 mm 的等距点. H 到 K 4 个点则为竖直方向的点,其中 I、J 为俯视图上重合点(I 为竖面的下端点, J 为竖面的上端点).

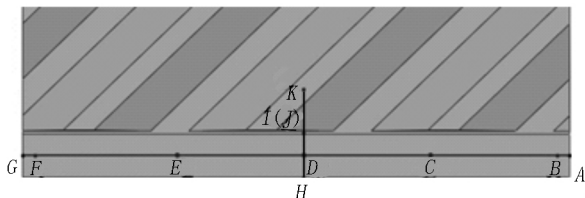


图6 A~K 点分布

图 7 是 3 种焊接速度下 A~K 11 个点的热循环曲线,图 7 显示,不同焊接速度下各点热循环曲线具有类似的形态,并可从中得到一些相似的规律:各点受到热源照射时都能瞬间达到峰值温度,然后随着热源的远离又快速冷却,所以热循环曲线在高温段呈现出“针尖状”. 在冷却过程中,部分点固相线和液相线之间存在一个“恒温小平台”,当各点温度低于固相线温度  $1633.15 \text{ K}$  后,各点冷却速度逐渐减缓. 未受热源直接照射的 A、G 2 点峰值温度只有  $1000 \text{ K}$  左右,垂直焊接方向分布的 H~K 4 个点,除了 H 点离热源较近,峰值温度达到  $1200 \text{ K}$  以上,其他峰值温度更低,都低于  $1000 \text{ K}$ ,并且温度曲线升温更平缓. 而起焊点 B 和焊接终点 F 虽然受到了激光热源的直接照射,但是激光照射时间较短,峰值温度也较低,在焊接速度为  $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,只有  $1000 \text{ K}$  和  $1400 \text{ K}$ . 在实际焊接过程中,焊接起点和焊接终点附近容易出现未熔合、未熔透等焊接缺陷,

故对精密焊接需要考虑恰好熔透到焊接起点和焊接终点的距离(简称为“起焊距离”),并且从 B、F 2 点的热循环曲线可看到,焊接起点的峰值温度比焊接终点的温度更低,说明焊接起点有更差的熔透性.

从图 7 中还可看出,不同焊接速度下各研究对象点的峰值温度有明显差异. 如随着焊接热源的移动,沿线各点的峰值温度逐渐升高,并经过一段距离后达到准稳态. 但是在不同焊接速度下,各点的峰值温度差距较大,焊接速度越慢,各点峰值温度越高,如  $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  移动速度,峰值温度达到  $2500 \text{ K}$  以上,而  $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  移动速度,峰值温度只要  $2000 \text{ K}$  左右,温度降低 20%,而且峰值温度持续时间相对较短. 改变焊接速度,本质上是改变了单位距离输入的能量,即改变了焊接线能量.

## 2.2 应力场分析

表 2 为通过数值模拟得到的不同焊接速度和焊接功率下的起焊距离,从表 2 可看出,同一种焊接速度不同焊接功率下起焊距离差别较大,和同一种功率下不同焊接速度引起的起焊距离相差也比较大. 当焊接速度最小为  $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、焊接功率最大为  $3500 \text{ W}$  时,起焊距离最小,只有  $0.56 \text{ mm}$ .

表2 不同焊接功率、焊接速度下起焊距离 mm

焊接速度 / ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	焊接功率 / W		
	2 500	3 000	3 500
50	1.14	0.81	0.56
75	2.52	1.52	1.08
100	4.41	3.22	2.32

图 8 为当焊接速度为  $75 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时的直缝焊在不同时刻的应力场分布. 从图 8 可看到:1) 随着热源的移动,由于母材板片温度升高,金属结构内部出现热膨胀,板片的内应力由焊接起始端逐渐跟随热源向焊接终端移动. 在焊接过程中,有 2 个热应力比较集中区域:一个是焊接熔池周围大梯度温度分

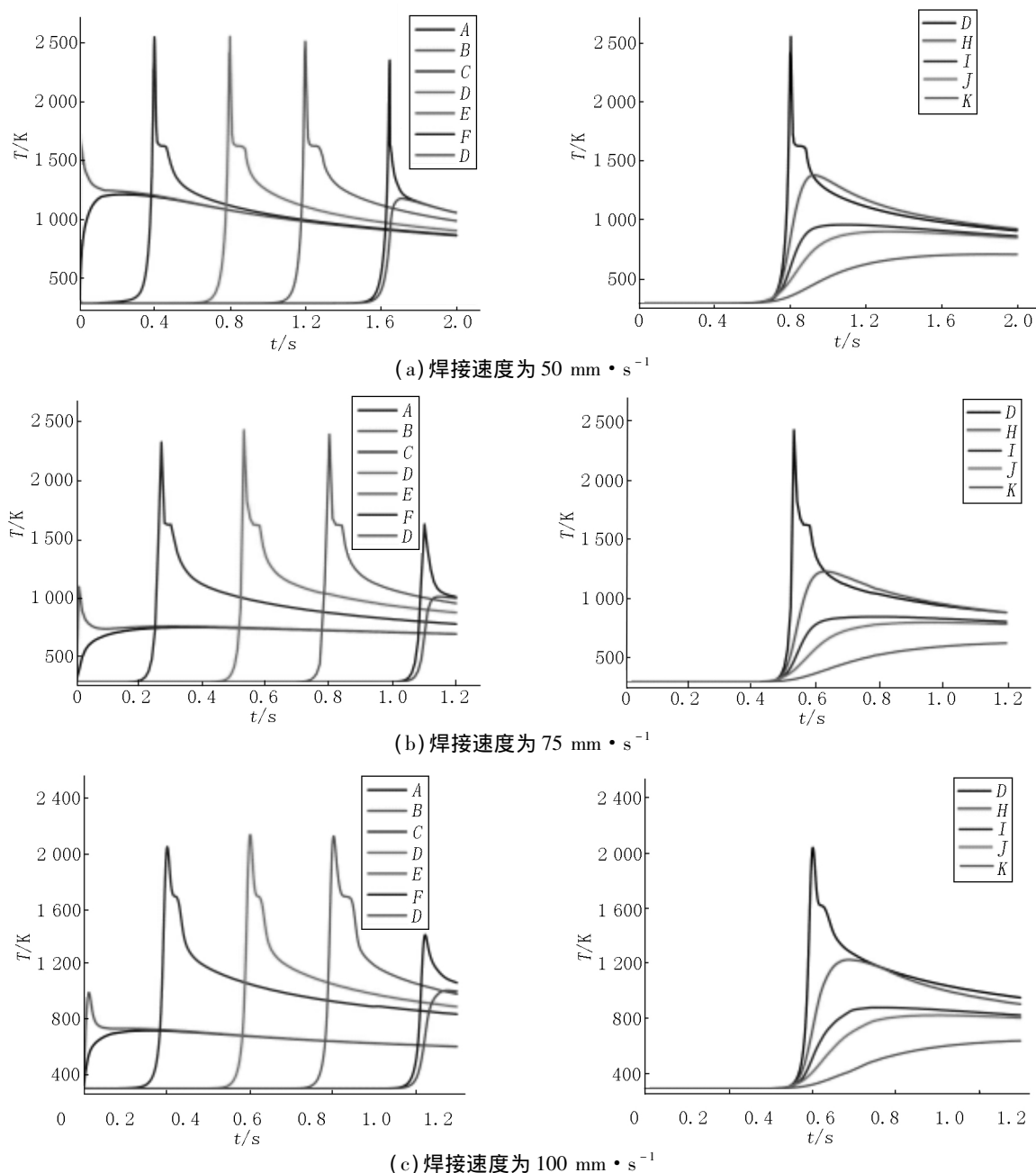


图7 不同焊接速度下各点热循环曲线图

布区域,另一个是板片与夹具接触位置.在图8中有一个移动的呈“水滴状”的低应力区,此处即为金属熔化内部应力得到释放的熔池区域,而在其周围未熔化的热影响区往往温度较高,热膨胀效应较为明显,所以焊接过程焊缝周围热应力较大,焊后残余应力也较多,容易出现焊接裂纹.而对于母材与夹具接触的位置,因为夹具往往是由刚度较大的铸铁制造,焊接过程接触面的热膨胀以及其他地方热膨胀引起此处的形变都被夹具严格限制,从而内生出较大的瞬时应力;2)4个时刻板片内瞬时应力最大值都是出现在母材与夹具接触位置: $t=0.3 \text{ s}$ 、 $t=0.6 \text{ s}$ 、 $t=0.9 \text{ s}$ 时刻出现在焊接起始端与夹具接触的位置,热

应力都在  $156 \text{ MPa}$  以上, $t=1.2 \text{ s}$ 时刻出现在焊接终端与夹具接触的位置,热应力达到了  $227 \text{ MPa}$  以上.直缝焊有持续热量输入,热膨胀更大,并且焊接方向板片宽度更窄,所以相对于波纹板片点焊,直缝焊在板片两侧与夹具接触位置的应力集中更明显.

图9为激光焊功率为  $3000 \text{ W}$  时不同焊接速度下应力分布图.图9左边柱状图为不同焊接速度下不同时刻板片内瞬时应力最大值,右边为不同焊接速度下,整个焊接过程应力最大时刻的应力场分布云图.图9显示,当热源开始加热时,板材应力也瞬时升高,最低也有  $150 \text{ MPa}$ ,这是由于母材局部迅速升温膨胀导致热应力的作用.随着热源峰值温度逐渐

稳定,母材瞬时应力最大值也逐渐达到相对稳定状态。

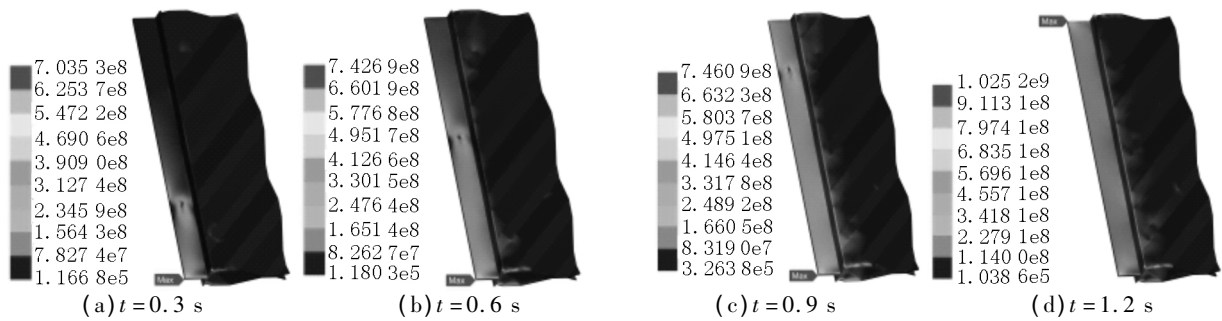


图8 直缝焊过程瞬时应力场(单位: Pa)

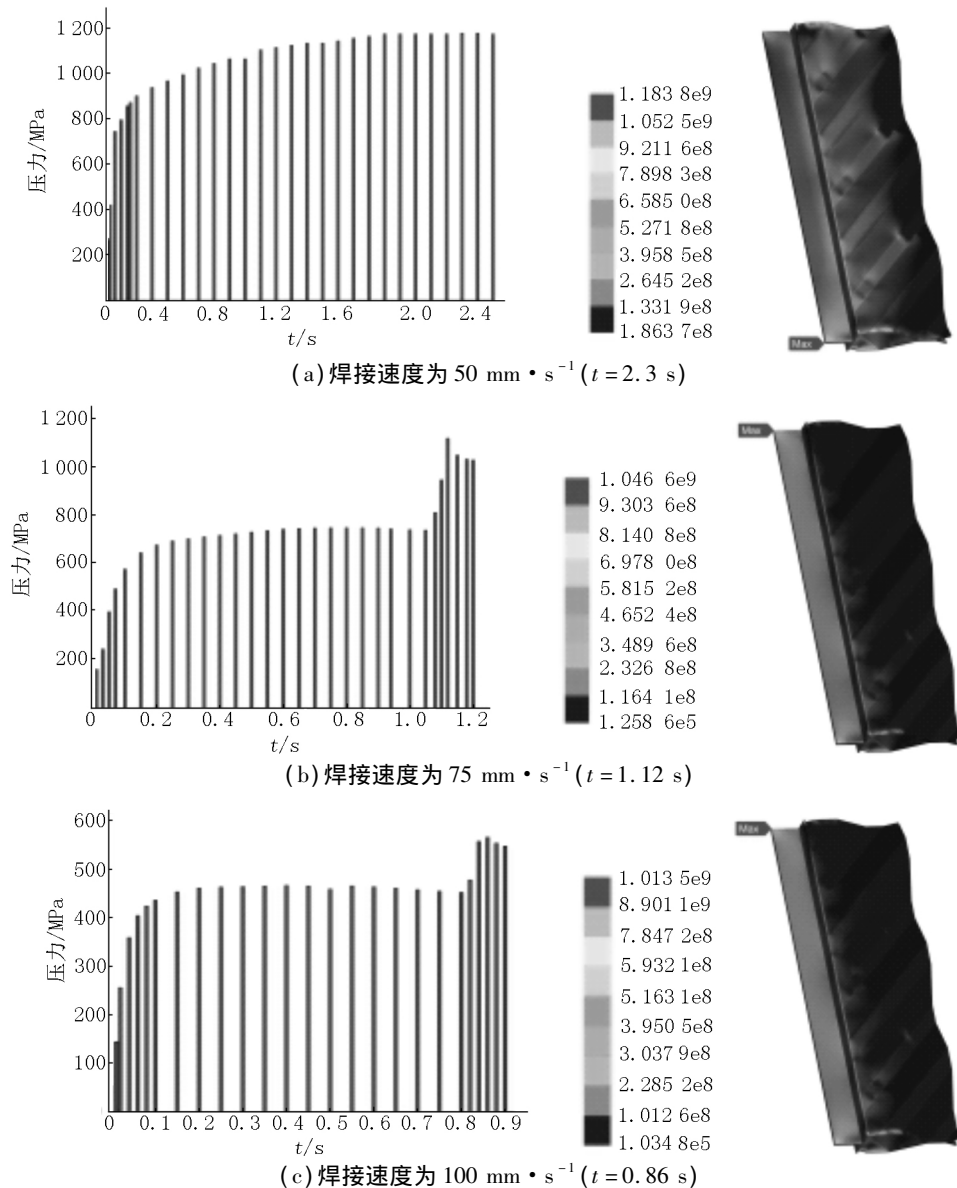


图9 板片内瞬时应力最大值及整个焊接过程应力值时刻应力分布云图(单位: Pa)

从柱状图中还可看出,不同的焊接速度、准稳态阶段应力最大值的变化趋势不一样。1)当焊接速度为  $50\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,板片内应力最大值在准稳态下依然缓慢增加,焊后在  $t=2.30\text{ s}$ 时达到最大值,最大值为  $1\,183\text{ MPa}$ ;2)当焊接速度为  $75\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,板片

内应力最大值在准稳态比较稳定,但在  $t=1.04\text{ s}$ 时迅速增加,在  $t=1.12\text{ s}$ 时达到最大值,最大值为  $1\,120\text{ MPa}$ ;3)当焊接速度为  $100\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,板片内应力最大值在准稳态下有所降低,但在  $t=0.80\text{ s}$ 时迅速增加,在  $t=0.86\text{ s}$ 时达到最大值,最大值为

568 MPa. 不同焊接速度下,板片瞬时内应力最值在准稳态阶段变化趋势的巨大差异,主要与热量的持续输入累积的形变、激光器在母材加热的瞬间高温引起的热应力有关.从图9右侧云图可以看到,焊接应力最大值都是出现在焊后夹具位置.故对于直缝焊,焊后及时松开夹具,将有利于降低焊件内应力.

### 3 结论

本文采用旋转高斯移动体热源建立了波纹板片激光直缝焊的瞬态分析模型,并主要研究和分析了不同焊接速度下激光直缝焊的温度场、波纹板片瞬态应力场.结果表明:1)在激光焊功率为3 000 W情况下,当焊接速度为 $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,峰值温度最高达到2 500 K,起焊距离最短,只有0.81 mm,而且瞬态应力最大值准稳态持续时间长,且还有上升的趋势;2)当焊接速度为 $75 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,瞬态应力最大值准稳态相对稳定,但是当临近焊接结束时,瞬态应力最大值都有突然增大的趋势,而且最大瞬态应力都靠近夹具位置.

### 4 参考文献

- [1] 樊丁,余淑荣,张建斌,等.激光焊接发展现状及动向[J].甘肃工业大学学报,2003,29(1):15-18.
- [2] 李亚江,李嘉宁.激光焊接/切割/熔覆技术[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [3] 李亚江,王娟.特种焊接技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [4] 伍强,陈根余,王贵.高强度镀锌钢的 $\text{CO}_2$ 激光焊接[J].中国激光,2006,33(8):1133-1138.
- [5] Ascari A, Fortunato A, Orazi L, et al. The influence of process parameters on porosity formation in hybrid LASER-GMA welding of AA6082 aluminum alloy[J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(5):1485-1490.
- [6] 李时春.万瓦级激光深熔焊接中金属蒸气与熔池耦合行为研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [7] 张国伟.厚板超窄间隙光纤激光焊接理论及实验研究[D].北京:北京工业大学,2014.
- [8] 张健,杨锐.激光焊接钛合金薄板时的功率控制[J].中国激光,2012,39(1):71-74.
- [9] 陈树海,张茗馨,李猛,等.钢/铝异种金属光纤激光熔钎焊数值模拟[J].焊接学报,2015,36(10):21-25.
- [10] 王宏,史耀武.大功率激光作用下小孔形成数值模拟[J].中国激光,2007,34(4):564-568.
- [11] 周永涛,丁林,李明喜.低碳钢激光焊接温度场模拟[J].应用激光,2007,27(5):393-397.
- [12] 张瑞华,陈磊,冷小冰.大功率激光焊熔池特性的数值模拟[J].焊接,2009(10):29-33.
- [13] Abderrazak K, Bannour S, Mhiri H, et al. Numerical and experimental study of molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy[J]. Computational Materials Science, 2009, 44(3):858-866.
- [14] Turňa M, Taraba B, Ambrož P, et al. Contribution to numerical simulation of laser welding[J]. Physics Procedia, 2011, 12:638-645.
- [15] 张全顺,汪丽娜,侯继军.激光焊接数值模拟不同热源分析[J].西部资源,2015(4):57-58.

## The Numerical Simulation and Analysis of Laser Straight Seam Welding Process of Stainless Steel Sheet

ZHAO Jing, CAO Songyang, JIAN Qifei\*, XIAO Jinping

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** Taking 304 stainless steel sheet as the research object, the physical model of transient behavior of laser longitudinal welding is established from the perspective of fluid mechanics and heat transfer process, and the change of temperature and stress field in the whole process is visualized. The results show that when the laser welding is 3 000 W power, the peak temperature is up to 2 500 K when the welding speed is  $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the welding distance is the shortest, only 0.81 mm.

**Key words:** laser welding; transient behavior; numerical simulation; visual analysis

(责任编辑:王金莲)