

大功率光纤激光焊焊缝跟踪偏差红外检测方法^{*}

高向东¹⁾ 莫玲^{1)†} 仲训果¹⁾ 游德勇¹⁾ Katayama Seiji²⁾

1) (广东工业大学机电工程学院, 广州 510006)

2) (大阪大学接合科学研究所, 日本大阪 567-0047)

(2010年9月1日收到; 2011年3月10日收到修改稿)

精确控制激光束使其始终对准并跟踪焊缝是保证激光焊接质量的前提. 针对大功率(激光功率 10 kW) 光纤激光焊接 304 型不锈钢紧密对接焊缝(间隙为 0—0.1 mm), 研究一种基于红外热像的焊缝跟踪偏差检测新方法. 采用红外传感高速摄像机摄取焊接区域熔池红外动态热像, 分析激光束对准和偏离焊缝中心时的熔池温度分布和红外辐射特性, 以熔池匙孔形变参数和热堆积效应参数作为激光束与焊缝中心偏差检测特征值, 通过图像识别技术研究和分析特征值与焊缝偏差之间的关系. 激光焊接试验结果表明, 熔池匙孔形变参数和热堆积效应参数与焊缝偏差之间存在密切的数学关联, 能有效判断和检测激光束与焊缝之间的偏差.

关键词: 大功率光纤激光焊, 焊缝跟踪偏差, 红外热像, 检测

PACS: 81.20. Vj, 42.55. Wd, 87.57. N-

1. 引言

大功率光纤激光焊与传统焊接方法相比, 具有焊接速度快、焊缝热影响区小和深宽比大等优点, 能保证高能量集中性, 实现多种金属和非金属焊接^[1]. 特别是焊接厚板材料, 大功率光纤激光焊无需开坡口和填充材料, 一次焊接成型, 大大节约了工时和成本. 由于焊接前夹具的装配误差和焊接过程中工件的热变形, 使得焊缝路径往往偏离预定轨迹, 造成焊缝跟踪偏差, 通常激光束与焊缝之间的偏差大于 0.2 mm 即可导致焊接工件报废, 因此必须准确实时地识别和跟踪焊缝. 但激光束功率密度高, 光斑直径小, 焊缝间隙通常很小, 再加上激光焊接速度快, 要实时准确地识别和跟踪焊缝是十分困难的. 对大于 0.2 mm 间隙的焊缝跟踪可采用结构光视觉跟踪方法^[2], 但对小于 0.1 mm 间隙的焊缝跟踪目前还没有很好的解决方法.

对于传统焊接熔池区域信息的分析, 常见方法有焊接电流信号分析法和特征谐波振幅分析法等^[3]. 热辐射伴随着整个焊接过程并含有丰富的焊接质量信息^[4,5], 当激光束对准和偏离焊缝时, 熔池区域温度分布和热辐射一定存在变化, 其红外热像

特征存在差异. 为此, 本文以大功率光纤激光焊接 304 型不锈钢板为试验对象, 采用红外传感高速摄像机拍摄焊接区熔池红外动态热像, 分析激光束对准和偏离焊缝时的熔池红外热像特征变化. 定义熔池匙孔形变参数和热堆积效应参数作为检测激光束与焊缝偏差的特征值, 探索其与焊缝偏差之间的内在规律, 研究一种基于红外热像的大功率光纤激光焊焊缝跟踪偏差检测新方法.

2. 试验装置

试验装置包括 IPG Photonics 公司生产的 YLR-10000 系列光纤激光焊接设备、松下公司生产的 VR-016 型六关节机器人、保护气瓶和焊接工作台. 焊接工作台配有 NAC 公司生产的 Memrecam fx RX6 型高速摄像机、精密伺服电动机和夹具等. 视觉传感器前设置光谱范围为 960—990 nm 的近红外窄带抗扰光学滤光器, 以消除等离子体辐射和飞溅等干扰, 获取最佳熔池区域红外热像^[6]. 大功率光纤激光焊接试验装置结构如图 1 所示, 滤光器的响应曲线及组合效果如图 2 所示.

试验材料选用厚度为 10 mm 的 304 型不锈钢板, 尺寸为 150 mm × 49 mm × 10 mm, 端面经过精加工,

^{*} 广东省自然科学基金(批准号: 10251009001000001, 9151009001000020, 07001764)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20104420110001)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ling-mo@163.com

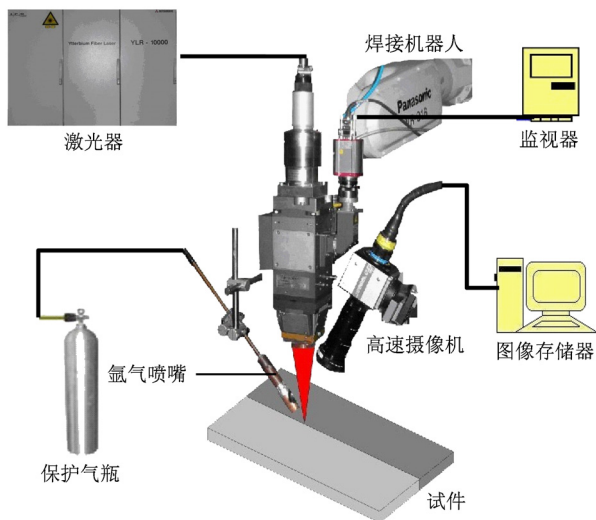


图1 激光焊接试验装置示意图

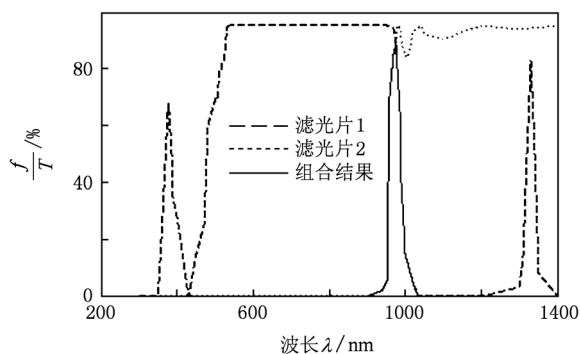


图2 滤光器的组合响应

工作台上的夹具将两块钢板对接夹紧时形成的焊缝间隙不大于 0.1 mm. 依据工业现场实际焊接过程焊缝偏差情况, 试验焊接路径采用“斜线”对接焊的方式, 激光束运动路径斜跨焊缝, 即激光束从偏离焊缝中心线逐渐对准再到偏离焊缝中心线. 这样可以充分观察和分析激光束对准和偏离焊缝时的熔池区域温度分布及热辐射特征的变化. 在整个试验过程中, 激光束焊接路径为 135 mm, 共采集 3243 帧熔池红外热像, 包含了激光束对准与偏离焊缝时的情况. 大功率光纤激光焊接试验条件列于表 1.

表1 焊接试验条件

激光功率 /kW	光斑直径 / μm	焊接速度 / $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	氩气流量 / $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	摄像速率 / s^{-1}	滤波波长 /nm	焊接方式
10	200	2.5	20	1000	960—990	对接焊

3. 匙孔形变参数

就机理而言, 焊接过程是一个涉及传热学、材

料冶金学、固体和流体力学等多学科交叉的复杂现象. 根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 红外辐射总能量 $M(T)$ 随温度 T 的变化规律可用下式^[7]表示:

$$\begin{aligned}
 M(T) &= \int_0^\infty \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[hc/(\lambda kT)] - 1} d\lambda \\
 &= \int_0^\infty \frac{C_1 d\lambda}{\lambda^5 (\exp[C_2/(\lambda T)] - 1)} \\
 &= \frac{\pi^4}{15} \frac{C_1}{C_2^4} T^4 \\
 &= \sigma T^4,
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 c 为光速, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, $C_1 = 2\pi hc^2$ 为第一辐射常数, $C_2 = hc/k$ 为第二辐射常数, $\sigma = \pi C_1 / (15 C_2^4) = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数.

由(1)式可知, 红外辐射总能量 M 与热力学温度 T 的四次方成正比, 当温度有较小变化时, 将引起红外辐射总能量的很大变化, 体现在红外热像上有相应的形态变化^[8]. 激光焊接过程中, 金属材料剧烈汽化膨胀产生压力挤压熔融材料, 能量驱动下导致部分熔融金属凸于材料表面, 激光束照射区域出现熔池匙孔效应. 匙孔处聚集了激光束大量能量, 激光束通过匙孔壁将能量传递并被金属材料所吸收, 而随着激光束偏移焊缝中心线, 热分布发生变化, 在熔池红外热像上将出现明显的形态变化. 对整组试验数据进行研究发现, 随着激光束沿着焊缝位置移动, 匙孔随着激光束左偏离、对准到右偏离焊缝, 匙孔最低端位置的横坐标变化呈近似线性递增规律. 为研究匙孔形变与激光束偏离焊缝位置的关系, 将其量化并定义熔池红外热像匙孔前端在灰度图像中的横向坐标为匙孔形变参数.

3.1. 熔池热像预处理

由于焊接过程伴随着多种干扰, 红外热像往往存在不确定因素, 难以直接获得有用的焊缝位置信息, 需要对熔池红外热像进行滤波去噪和图像分割等预处理, 从而获取有用的匙孔边缘轮廓信息. 中值滤波是一种非线性的图像局部平滑处理方法, 能够抑制脉冲干扰和椒盐噪声, 同时保持图像的细节部分, 防止边界模糊. 这里先以大小为 3×3 像素的模板进行中值滤波, 然后采用 Otsus 自适应阈值分割算法对滤波后的熔池热像进行匙孔图像分割^[9]. 熔池原始图和熔池匙孔分割图分别如图 3 和图 4 所示.

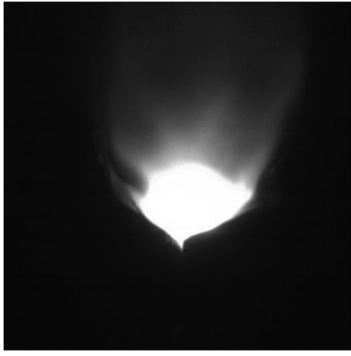


图 3 熔池原始图

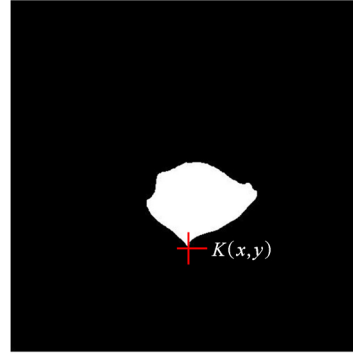


图 4 匙孔分割图

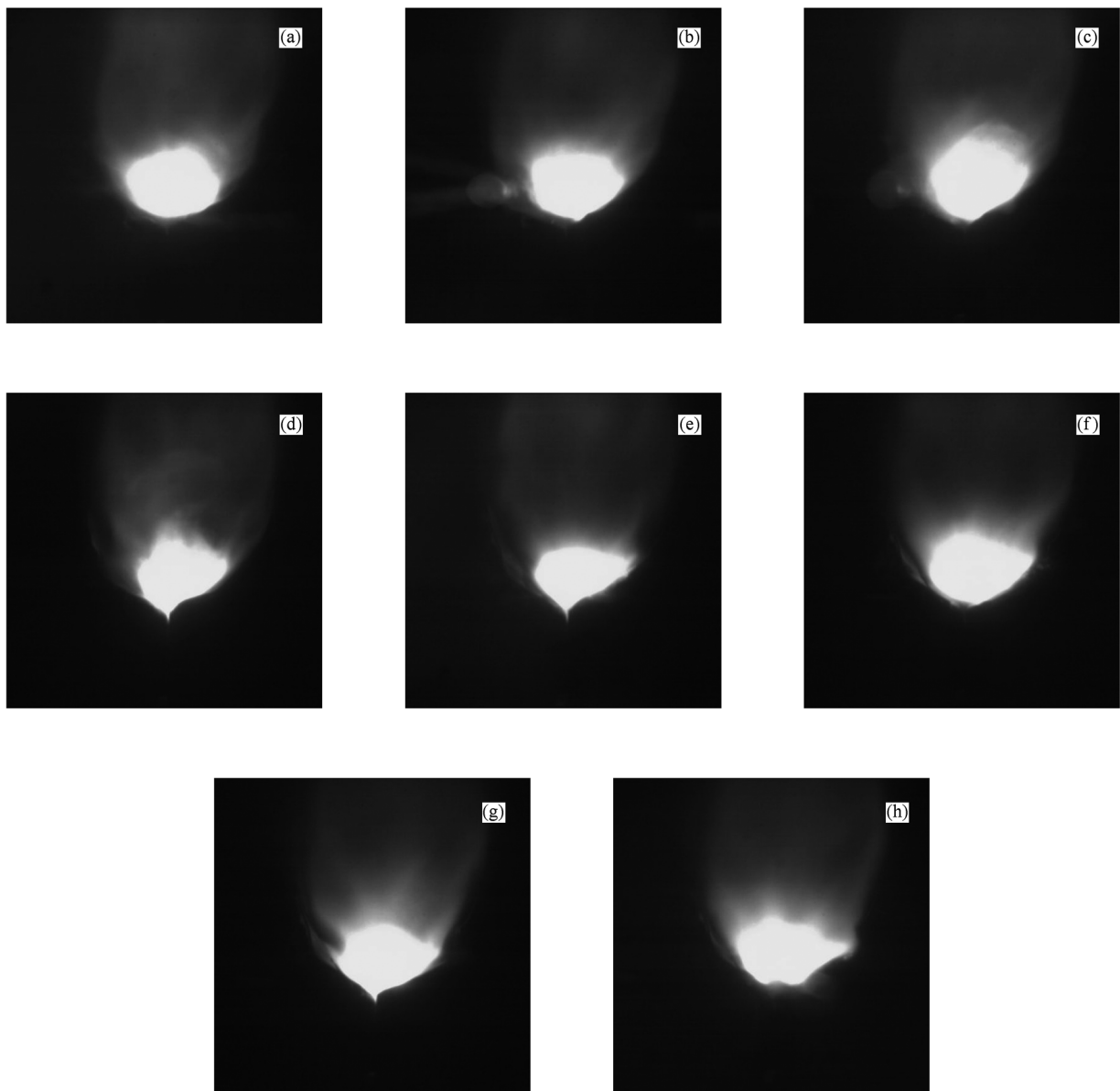


图 5 连续 8 帧熔池红外热像序列图像 (a) $t = 2116$ ms, (b) $t = 2117$ ms, (c) $t = 2118$ ms, (d) $t = 2119$ ms, (e) $t = 2120$ ms, (f) $t = 2121$ ms, (g) $t = 2122$ ms, (h) $t = 2123$ ms

3.2. 匙孔形变参数

经过图像预处理后,对分割后的匙孔图像进行逐行扫描,并以熔池匙孔轮廓最底端点 $K(x, y)$ 的横坐标作为匙孔形变参数 K_x ,如图 4 所示. 通过试验数据观察,探索匙孔形变参数与焊缝位置的关联. 图 5 为从第 2116 帧开始的连续 8 帧大小为 512×512 像素熔池红外热像序列图像. 对这 8 帧图像进行处理并计算匙孔形变参数,计算结果如图 6 所示. 由于 8 帧图像对应的时间仅为 8 ms, 在较短的时间段内难以得到匙孔形变参数与焊缝偏差之间的关系,需要对大量试验数据进行统计分析.

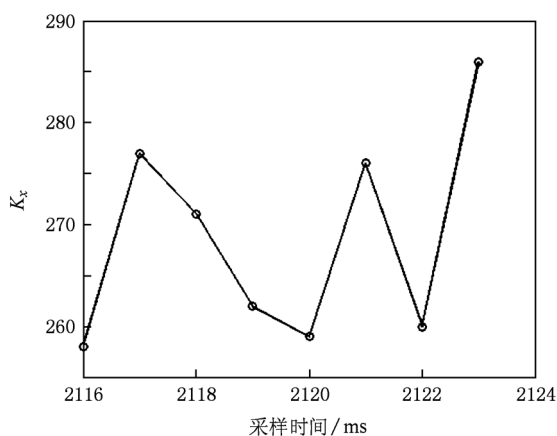


图 6 连续 8 帧熔池红外热像序列对应的匙孔形变参数 K_x

4. 热堆积效应参数

热过程贯穿着整个激光焊接^[10,11],在激光焊接过程中两块对接焊接材料之间仍然存在微小间隙,由于热量在焊接母材和空气中的传导率存在差异,热传播在此遇到较大的阻力而产生“热堆积”,反映到红外热像中,焊缝位置灰度会发生突变,出现较大的灰度梯度值^[6]. 为研究焊接过程中热能堆积与激光束与焊缝位置中心偏移量之间的关联,选择熔池匙孔前端非融化区域作为分析热堆积效应参数的目标区域. 经过试验比较,逐行扫描熔池红外热像,观测热像中熔池匙孔前端区域 120 行左右的灰度分布情况能够较好地反映热堆积效应. 选择第 389 行的灰度分布曲线,灰度曲线峰值 P 所对应横坐标作为热堆积效应参数 x_p ,如图 7 所示.

对图 5 中连续 8 帧熔池红外热像进行分析,发现不同时刻熔池形状变化不一,根据每一帧图像选取第 389 行灰度分布求出对应的热堆积效应参数.

经过试验比较,该热堆积效应参数能够反映激光束与焊缝中心线偏离关系. 图 8 为各帧热像的第 389 行灰度分布曲线,图 9 为 8 帧熔池红外热像对应的热堆积效应参数. 激光束对准焊缝中心线时,对应第 2119 帧熔池红外热像(图 5(d)),此时热堆积效应参数接近熔池红外热像的中心线,灰度曲线左右几乎对称. 其他时刻的热像对应于激光束偏离焊缝,热堆积效应参数也随之上下波动.

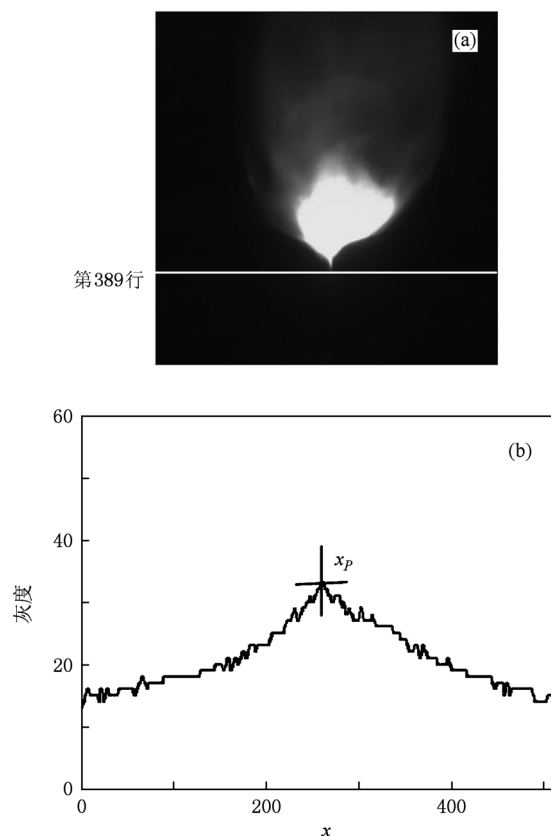


图 7 热堆积效应参数 (a) 熔池原始图, (b) 第 389 行灰度分布

5. 试验结果及分析

5.1. 匙孔形变参数分析

在激光焊接试验过程中,控制激光束的路径从左偏→对准→右偏焊缝中心,如图 10 所示. 为充分观察激光束与焊缝对准和偏离时的不同焊接状态,在焊接初始阶段特意将激光束偏离焊缝中心进行焊接(相当于“堆焊”),此时激光束未接触到焊缝位置. 随着激光束沿焊接方向移动,逐渐过渡到接触焊缝的对接焊. 激光对接焊在工业实际应用中,激光束与焊缝之间的偏差须控制在一定范围,激光束

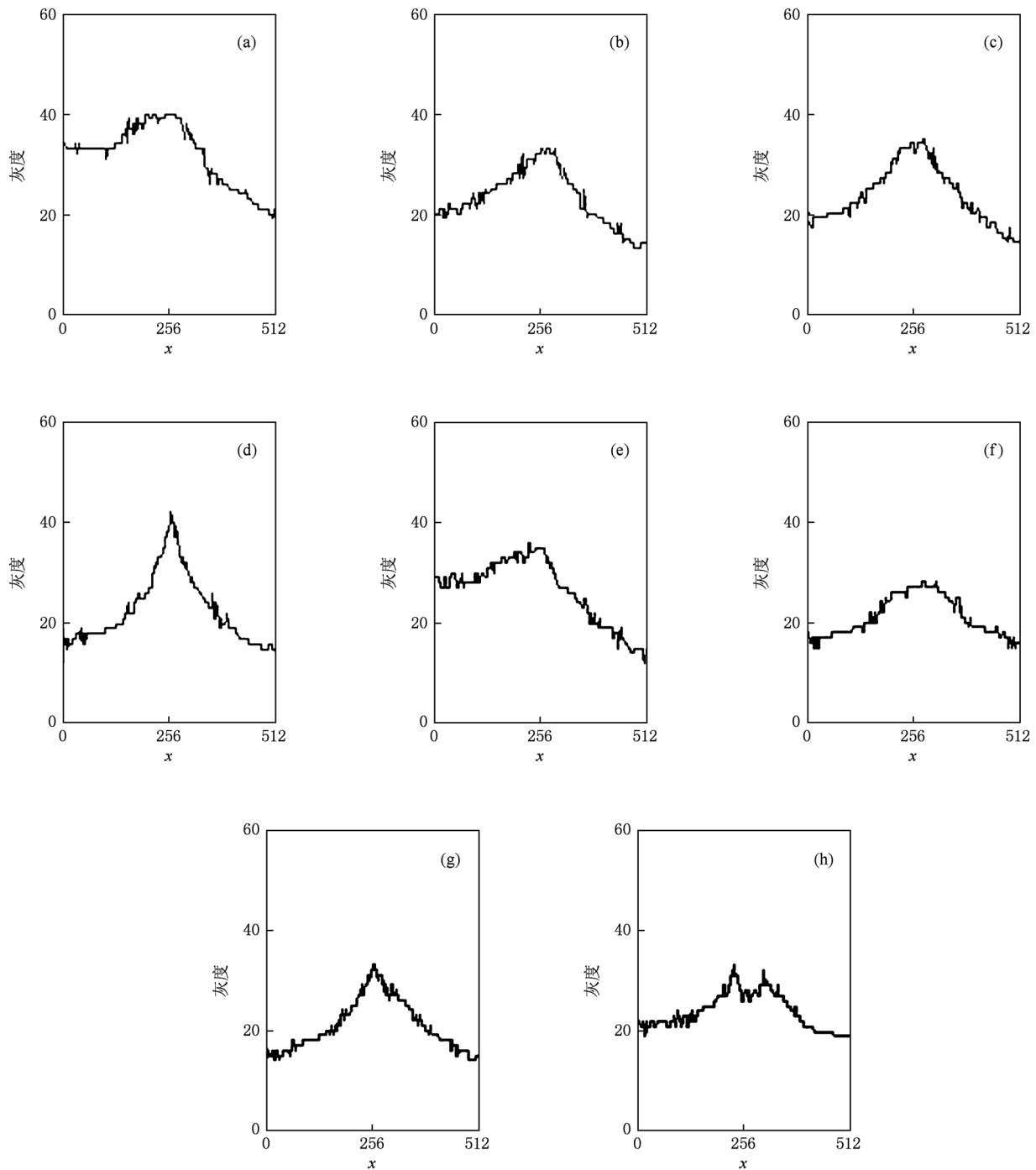
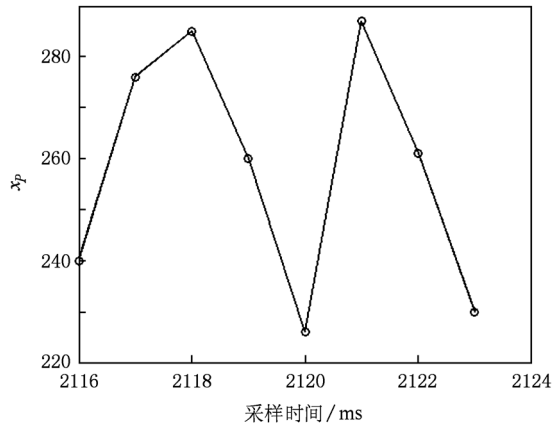


图8 8帧熔池热像序列中各帧图像的第389行灰度分布 (a) $t=2116$ ms, (b) $t=2117$ ms, (c) $t=2118$ ms, (d) $t=2119$ ms, (e) $t=2120$ ms, (f) $t=2121$ ms, (g) $t=2122$ ms, (h) $t=2123$ ms

光斑一般不会偏离到完全脱离焊缝的程度. 因此, 采用高速摄像机重点对激光束在焊缝中心线位置附近小范围偏离的红外热像进行分析. 激光束焊接起始于焊缝左侧钢板, 持续 1000 ms 左右后逐渐趋于焊缝. 而在实际焊接生产过程中, 激光束通常在焊缝邻近处. 为此, 分析对应偏差范围 $[-0.25$

mm, $+0.30$ mm] 区间的第 1800 幅到 2800 幅的红外热像, 研究匙孔形变参数与焊缝偏移量的关系. 图 11 给出了匙孔形变参数 K_x 随图像序列(焊缝偏移)的变化分析结果, 图中连续平滑曲线为匙孔形变参数的拟合结果. 随着图像序列的增加即焊缝偏差的逐渐增大, 匙孔形变参数出现递增趋势, 说明

图9 熔池热像序列热堆积效应参数 x_p

熔池匙孔形态或匙孔形变参数与焊缝偏离之间存在着一一定的关系.

对匙孔形变参数做进一步分析发现:在[1800, 2150]图幅区段,匙孔形变参数值随着焊接过程上

下波动并大体呈现非线性递增趋势.第2150幅图附近出现明显下降,此时激光束由偏离焊缝位置进入焊缝中心,造成了匙孔形态的剧烈变化及红外热像热堆积效应参数的突变.在[2150, 2500]图幅区段,激光束的聚焦点大部分在焊缝间隙中及两边邻近区域,热分布规律明显,焊接状态较稳定.匙孔形变参数 K_x 随着激光束与焊缝的偏离,呈现出近似线性变化规律.虽然整个焊接过程中伴随一定程度的波动,但是总体波动幅值近似相等,并且波动与匙孔的实时变化密切相关.在激光焊接过程中,熔融金属的热膨胀和冷缩导致匙孔形态周期性地出现扩张与收缩^[12],导致匙孔形变参数周期性波动,其变化趋势能够反映激光束偏离焊缝的程度.在[2500, 2800]图幅区段呈非线性变化,在第2500幅附近出现突降,此时激光束离开焊缝间隙并逐渐偏离焊缝,造成匙孔形态发生突变.

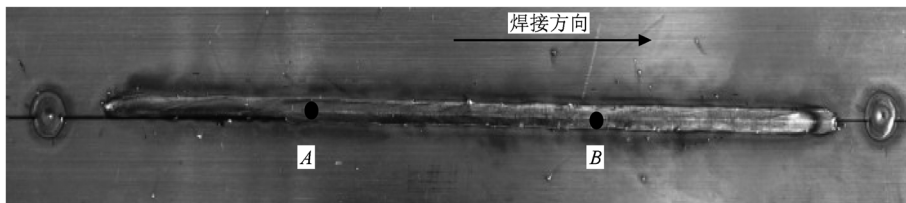


图10 焊件正面

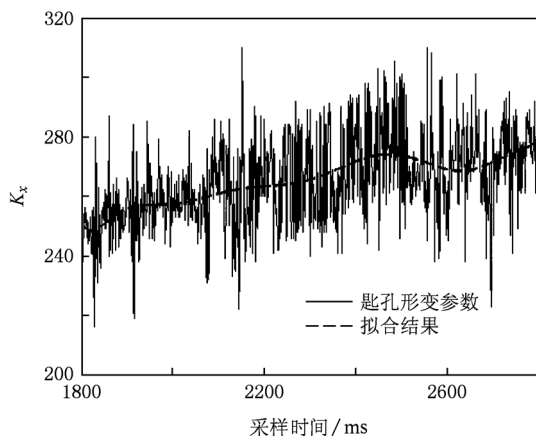


图11 焊件正面 AB 段对应匙孔形变参数的变化

对[1800, 2800]区段熔池红外热像的特征作进一步分析,以110 ms为间隔等分这组试验数据,分析10帧熔池红外热像并计算各时刻对应的匙孔形变参数值、增量、变化率以及最大和最小匙孔形变参数值,所得结果如表2所列.选取激光束对准焊缝的第2119帧图像对应的匙孔形变参数值247作为基准值 K_1 ,对当前图像的匙孔形变参数 K_x 与基准值的增量 ΔK 、变化率 $\Delta K/K_1$ 进行计算.统计发现,匙孔形变参数值随着激光束与焊缝之间的偏差而递增,递增幅度在40个像素值以内.匙孔形变参数的最小值247和最大值283分别出现在图像序列的起始位置和终点位置.由此可以判断,匙孔形变参数与激光束对准和偏移焊缝位置存在必然关联.

表2 熔池红外热像序列匙孔形变参数

t/ms	1800	1910	2020	2130	2240	2350	2460	2570	2680	2790
K_x	247	252	253	257	261	266	267	274	278	283
ΔK	0	5	6	10	14	19	20	27	31	36
$\Delta K/K_1$	0	2.02%	2.43%	4.04%	5.67%	7.69%	8.10%	10.93%	12.55%	14.57%

5.2. 热堆积效应参数分析

由斯蒂芬-玻尔兹曼定律可知,当一个物体表面的发射率不变时,该物体的红外辐射总能量与热力学温度的四次方成正比.激光束将能量施加到金属材料表面并扩散进入内部,扩散速度由金属材料内部性质决定,当金属材料存在缺陷或者空隙时,则热流被阻碍(热阻),经过时间延迟,在缺陷或者空隙位置发生热量堆积并在物体表面产生过热点,表现为温度异常.

两块金属材料在焊接过程中紧密对接形成焊缝,由于焊缝无法达到完全零间隙条件,则金属材料内部热流通过焊缝间隙传导时,在焊缝表面处将出现一个温度较高的变化.对应[1800,2800]区段1000帧熔池红外图像的热堆积效应参数如图12所示,图中虚线为热堆积效应参数的拟合结果.从图12可以明显看出,热堆积效应参数随着激光束偏离焊缝呈现出递增趋势,说明焊缝偏差与热堆积效应参数之间有着必然的联系.分析[1800,2800]区段内间隔110 ms的10帧熔池红外热像序列图像,计算得到各时刻对应的热堆积效应参数、增量、变化率以及最大和最小匙孔形变参数值如表3所列.选

取激光束对准焊缝的第2119帧图像对应的热堆积效应参数值230作为基准值 x_1 ,对当前图像的热堆积效应参数 x_p 与基准值的增量 Δx 、变化率 $\Delta x/x_1$ 进行计算.统计发现,热堆积效应参数值随着激光束与焊缝之间偏差的增大而递增.热堆积效应参数 x_p 的最大值为278, x_p 的最小值为230.随着激光束与焊缝之间偏差的增大,热堆积效应参数总体呈现递增趋势,表明热堆积效应参数能够反映激光束与焊缝位置的偏离程度.

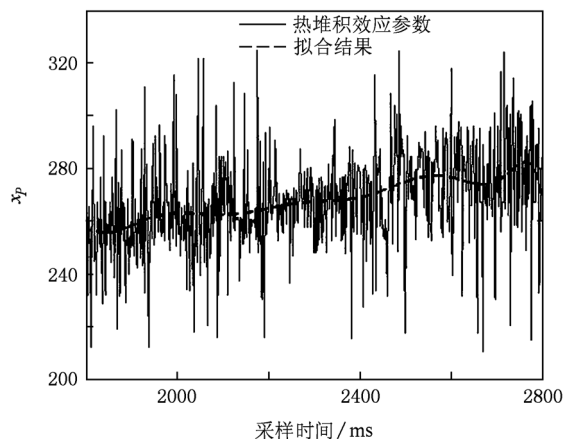


图12 焊缝正面AB段热堆积效应参数的变化曲线

表3 熔池红外热像序列热堆积效应参数

t/ms	1800	1910	2020	2130	2240	2350	2460	2570	2680	2790
x_p	230	233.3	235	242	261.5	262	268	270	275	278
Δx	0	3.3	5	12	31.5	32	38	40	45	48
$\Delta x/x_1$	0	1.43%	2.17%	5.22%	13.70%	13.91%	16.52%	17.39%	19.57%	20.87%

由于图像的采样速率较高,因而热像序列的热堆积效应参数值波动较大,且具有一定的随机性,需要根据一定数量的热堆积效应参数值并通过观察其变化趋势来判断激光束是否偏离焊缝.根据试验给出的200帧左右熔池红外热像的热堆积效应参数统计值即可分析出焊缝偏离情况,其对应的时间为200 ms,已可以满足大多数激光焊接的实时监控要求.

6. 结 论

对于大功率(激光功率为10 kW)光纤激光焊

接304型不锈钢紧密对接焊缝(0—0.1 mm),激光束与焊缝的偏离与熔池区域温度分布及红外辐射有着密切的关系.通过高速摄像机摄取激光焊接过程的熔池红外热像并定义匙孔形变参数和热堆积效应参数,分析了激光束偏离焊缝时的熔池形态及温度分布特征.结果发现,匙孔形变参数和热堆积效应参数与焊缝偏差之间存在一定的定量关系,参数值随着激光束与焊缝的偏离呈现出规律性的变化.通过计算两个参数可以有效地检测激光束与焊缝中心的偏离信息,为基于红外热像的大功率光纤激光焊接紧密对接焊缝的检测和焊缝跟踪控制提供了一种新方法.

- [1] Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S 2007 *J. Phys.* D **40** 5854
- [2] Noruk J, Boillot J P 2006 *Can. Welding Assoc. J.* **8**(Summer) 8
- [3] Cao B, Xiang Y P, Lü X Q, Zeng M, Huang S S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 865
- [4] Gong X F, Liu X Z, Ma Y, Ma Q Y, Qiu Y Y, Zhang D 2007 *Chin. Phys. B* **16** 2745
- [5] Mackwood A P, Crafer R C 2005 *Opt. Laser Technol.* **37** 99
- [6] Gao X D, You D Y, Katayama S, Kawahito Y 2009 *Proceedings of the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing* (Cobe: Japan Laser Processing Society) p289
- [7] Tan H P, Xia X L, Liu L H, Ruan L M 2006 *Numeric Calculation of Infrared Radiate Characteristic and Transfer——Heat Radiation Computing* (Harbin: Harbin Industry University Press) p12 (in Chinese) [谈和平、夏新林、刘林华、阮立明 2006 红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学 (哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社) 第12页]
- [8] Bo Y, Wang D W, Ying C T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2196 (in Chinese) [薄勇、王德武、应纯同 2003 物理学报 **52** 2196]
- [9] Gonzales R C, Woods R E, Eddins S L 2004 *Digital Image Using MATLAB* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p405
- [10] Huang R S, Liu L M, Song G 2007 *Mater. Sci. Eng. A* **447** 239
- [11] Liu L, Ye Y T, Wu Y F, Fang L, Lu J J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3172 (in Chinese) [刘霖、叶玉堂、吴云峰、方亮、陆佳佳 2007 物理学报 **56** 3172]
- [12] Xiang Z J, Li J L 2003 *Opt. Laser Technol.* **35** 5

Detection of seam tracking offset based on infrared image during high-power fiber laser welding *

Gao Xiang-Dong¹⁾ Mo Ling^{1)†} Zhong Xun-Gao¹⁾ You De-Yong¹⁾ Katayama Seiji²⁾

1) (Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

2) (Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Osaka 567-0047, Japan)

(Received 1 September 2010; revised manuscript received 10 March 2011)

Abstract

Seam tracking is a significant precondition to obtain good welding quality. During the laser welding, the laser beam focus must be controlled to follow the welding seam accurately. A novel approach to detecting the offset between the laser beam focus and the welding seam based on infrared image processing is investigated during high-power fiber laser butt-joint welding of type 304 austenitic stainless steel plates at a continuous wave fiber laser power of 10 kW. The joint gap width is less than 0.1 mm. An infrared sensitive high speed camera arranged in off-axis direction of laser beam is used to capture the dynamic thermal images of a molten pool. The characteristics of thermal distribution and infrared radiation of the molten pool, when the laser beam focus is deviated from the welding seam center, are analyzed. Two parameters called the keyhole morphological parameter and the heat accumulation effect parameter are defined as the characteristic values of seam tracking offset to determine the offset between the laser beam focus and the desired welding seam. Also, the image processing technique is used to analyze the infrared images of the molten pool, which indicates the presence of mathematic correlation between the defined two parameters and the seam tracking offset. The welding experiments confirm that the offset between the laser beam focus and the welding seam can be estimated by the keyhole morphological parameter and the heat accumulation effect parameter effectively.

Keywords: high-power fiber laser welding, seam tracking offset, infrared thermal image, detection

PACS: 81.20.Vj, 42.55.Wd, 87.57.N–

* Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant Nos. 10251009001000001, 9151009001000020, 07001764) and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education, China (Grant No. 20104420110001).

† Corresponding author. E-mail: ling-mo@163.com