

# 平面自主移动焊接机器人初始位置检测定位

尤帅 张华 周依霖 熊根

南昌大学 江西省机器人与焊接自动化重点实验室,南昌 330031)

**摘要** 平面自主移动焊接机器人用于在狭小的船舱格子间作业,其焊接初始定位主要依靠人力。但有时工人很难进入纵向空间狭小的格子间,且提起机器人需要克服机器人本身的重力和底座磁吸附力。利用超声波传感器的工作特性,将机器人旋转扫描壁面得到的位置信息,使用最小二乘法拟合出在整个扫描过程中垂直于壁面的时间点,建立机器人边距调整的数学模型,标定单目视觉传感器修正保护距离。结果表明,该系统解决了机器人检测定位初始焊接位置的问题,对于复杂的工作环境有较强的适应性。

**关键词:** 焊接初始位置 最小二乘法拟合 单目视觉

**中图分类号:** TG409

## 0 前言

船舶制造过程中,为了加强船体的强度,船舱底部设置格子型构件,该类结构体大多顶部密封、空间狭小且焊接路径上存在不规则流水孔,导致焊缝不连续,对焊接跟踪和焊接工艺造成了很大难度,目前主要靠人工来完成焊接,已成为制约制造业发展的瓶颈问题<sup>[1]</sup>。针对该类焊接工况,开发出的平面自主移动焊接机器人,可在焊接过程中自动识别流水孔从而控制旋转电弧的启停,实现焊接过程自动化<sup>[2]</sup>。在焊接前期工人需要用手提起机器人并放置到最佳的初始焊接位置,保证焊缝的成形。为保证整个焊接过程中的机器人能平稳前进和转向,在底盘安装了磁吸附装置。因此当工人提起机器人放置时,需要克服底盘对钢板产生的磁吸附力和机器人本身的重量。当焊枪接近焊缝时,底座磁吸附装置距钢板较近,磁力增大,调整难度增加。且在纵向空间狭小的格子作业时,工人很难进去调整。

因此文中着重解决了平面自主焊接机器人的焊接初始位置的定位问题。在机器人定位中常使用超声波对机器人进行定位,但其需要设置两个或两个以上坐标已知的超声波收发基站<sup>[3]</sup>,对于未知的焊接环境不具有自适应性。在视觉传感上常使用双目视觉进行测距<sup>[4]</sup>,但因其苛刻的标定过程不适用于小型焊接机器人。文中分阶段使用超声波传感器和单目视觉传感器进行焊接初始位置的检测和调整。

## 1 系统硬件结构

船舱的格子间结构如图 1 所示,机器人需要对格子间的垂直直角进行焊接初始位置定位和焊接作业。



图 1 工人在狭小的船舱格子间作业

机器人整体结构和传感器安装位置如图 2 所示。共装有 4 个传感器,其中旋转电弧传感器在焊接作业时反馈偏差信息,与单目视觉传感器一同安装在十字滑块的水平滑块上;装有 2 个超声波传感器,传感器 1 安装在两轮中心面上,与地面平行,用于直角转弯和初始位置调整时的防撞检测,传感器 2 安装在电弧传感器、驱动轮同垂直面上,用于检测初始位置。

底座机构如图 3 所示,采用两轮差速驱动和旋转,



图 2 传感器安装位置

步进电机减速比为 1:81, 超声波传感器下方安装有一个万向轮。

控制系统基于 PC104 接口开发, 采用研华 PCM3362 工控主板; 运动控制卡为 ART1020, 可独立控制四轴电机; 数据采集卡为 ART2932; 图像采集卡采用大恒 VT121, 使用 OpenCV 计算机开源图像处理库进行图像处理。

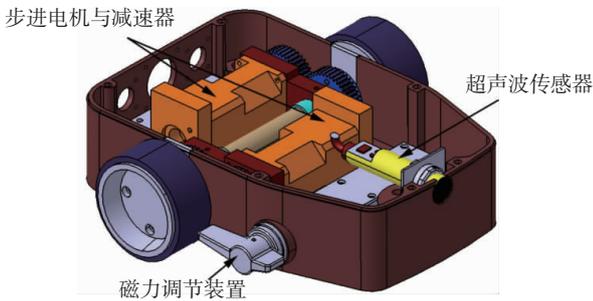


图 3 底座机构

## 2 机器人角度调整

平面自主机器人处于未知环境时, 与壁面位置有正、负倾角和垂直三类情况, 如图 4 所示, 焊接初始位置调整的第一步是需要将机器人调整到与竖立钢板垂直的状态。

超声波传感器工作示意图如图 5 所示, 有效工作角度为  $\pm 5^\circ$ <sup>[5]</sup>。当检测壁面与传感器夹角大于  $5^\circ$  时, 超声波将无法反馈距离信息, 数据采集卡端口电压为 0 V, 利用这一特性, 可通过判断信号的有无确定机器人的与竖立钢板的角度是否在  $\pm 5^\circ$  区间内。

当机器人初始位置为图 4a 所示时, 右轮锁紧, 左轮匀速正向前进, 机器人整体姿态以右轮为轴心, 顺时针匀速旋转并开始计时。超声波传感器 1 检测切线方向是否有壁面, 当检测到信号时判断是否到达临界最小旋转距离, 若达到最小距离时, 左轮应立即停止旋

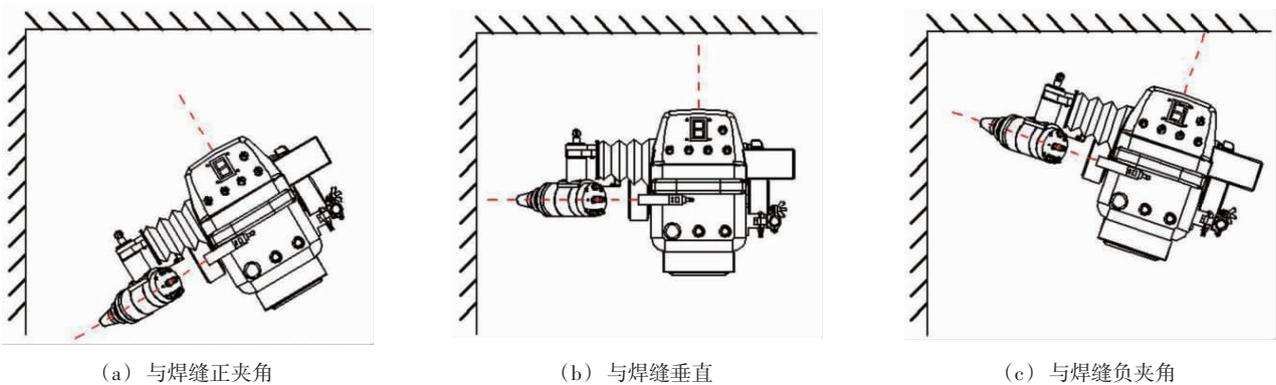


图 4 机器人初始位置

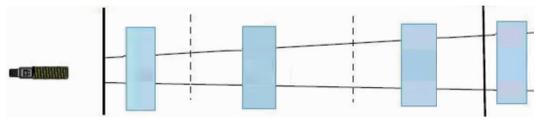


图 5 超声波传感器工作示意图<sup>[5]</sup>

转; 超声波传感器 2 以 200 ms 为采样周期采集电压。15 s 内采集到的电压值如图 6a 所示。

当旋转电弧到达理想焊缝位置时, 测量机器人与目标壁面之间最短距离为 173 mm, 转换为电压 2 280 mV。以 2 280 mV 为基准筛选有效检测点, 结果如图 6b 所示。

在机器人旋转过程中, 当超声波传感器 2 垂直于壁面时测的距离信息最短, 而超声波传感器 2 与壁面之间的距离是一个先增后减的过程, 观察特征点呈二次分布状态, 使用最小二乘法将散点拟合

成二次曲线。在此次扫描中, 令超声波电压  $V$  随时间  $t$  的变化公式为:

$$V = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \quad (1)$$

$\beta_0, \beta_1$  和  $\beta_2$  应使计算出的函数曲线与观察值的差平方和最小, 即

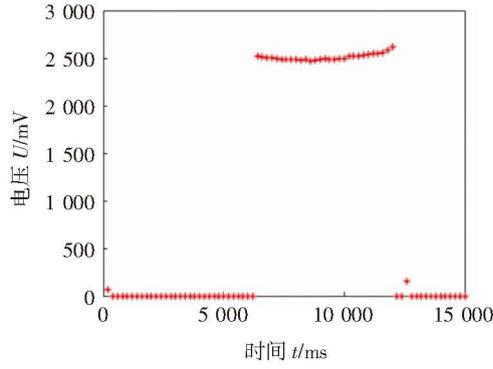
$$Q = \min \sum_{i=1}^n (V_{ie} - V_i)^2 \quad (2)$$

$V_{ie}$  为根据公式 (1) 的计算值,  $V_i$  是传感器测得的真实值。

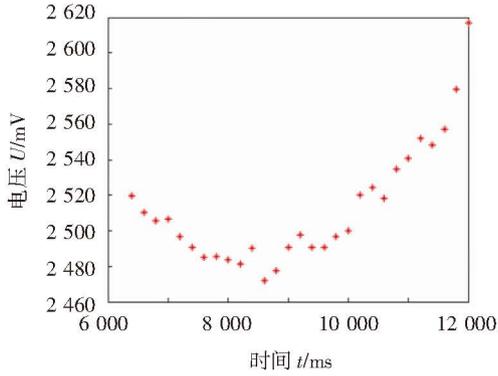
确立样本的回归模型:

$$Q = \min \sum_{i=1}^n ((\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2) - V_i)^2 \quad (3)$$

令:



(a) 初始采样值



(b) 截取采样值

图6 15 s内采样值处理

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial \beta_0} = 2 \sum_{i=1}^n [(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2) - V_i] = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \beta_1} = 2 \sum_{i=1}^n [(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2) - V_i] t = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \beta_2} = 2 \sum_{i=1}^n [(\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2) - V_i] t^2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

得到关于  $\beta_0, \beta_1$  和  $\beta_2$  的方程组:

$$\begin{cases} \beta_0 n + \beta_1 \sum_{i=1}^n t_i + \beta_2 \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n V_i \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n t_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n t_i^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^n t_i^3 = \sum_{i=1}^n t_i V_i \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n t_i^2 + \beta_1 \sum_{i=1}^n t_i^3 + \beta_2 \sum_{i=1}^n t_i^4 = \sum_{i=1}^n t_i^2 V_i \end{cases} \quad (5)$$

根据克莱默法则,有

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n V_i \\ \sum_{i=1}^n t_i V_i \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 V_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

将所有有效特征点代入拟合出  $\beta_0, \beta_1$  和  $\beta_2$ , 拟合曲线如图7所示。

当  $t_{\min} = -\frac{\beta_1}{2\beta_2}$  时,  $V$  值最小, 机器人与壁面的距离最短, 该时间点机器人与壁面垂直。扫描过程 15 s, 与  $t_{\min}$  的差值即为机器人的回程时间  $t_b$ , 即  $t_b = 15s - t_{\min}$ 。右轮锁紧, 左轮与前进时等速匀速反向驱动, 计时, 当到达  $t_b$  时机器人与壁面垂直, 左轮立即停止旋转。

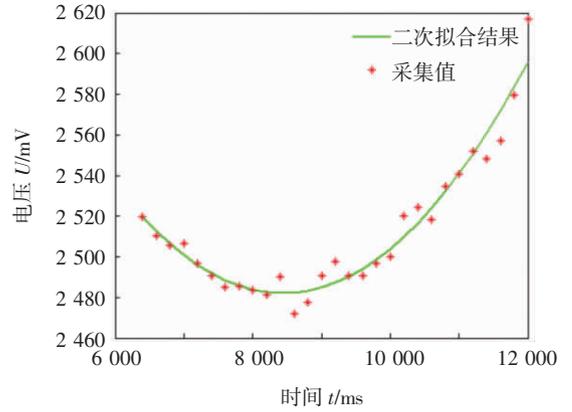


图7 截取采样点曲线拟合

### 3 边距调整

当机器人的角度调整与壁面垂直后, 超声波传感器 2 可重新采集机器人与壁面距离信息。在安装有旋转电弧传感器和单目视觉传感器的水平滑块调整至最右端位置限位时, 出丝点与超声波传感器 2 水平距离  $L_s$  为 1 730 mm, 超声波传感器 2 测得的壁面距离为  $L_f$ , 则机器人需要调整的边距  $L = L_f - L_s$ 。调整边距过程中, 右轮运动情况如图 8 所示。右轮定长驱动停止后, 左轮开始等长同向驱动。通过控制驱动的长度, 改变边距调整的距离且保持了机器人与壁面的角度。但在实际调整过程中, 当一个轮锁紧且另外一个轮转动从而带动机器人本体旋转时, 会产生滑动位移。因此需要设置保护距离  $L_p = 30$  mm, 防止调整边距过程中焊枪与壁面发生碰撞, 并为后一阶段的焊枪偏差的调整预留空间, 即  $L = L_f - (L_s + L_p)$ 。边距调整过程中共有两类情况, 当两轮中心线间的距离  $R > L$  时,

如图 8a 所示,  $\cos\theta = \frac{R-L}{R}$ 。则驱动距离  $S$  为:

$$S = (\arccos \frac{R-L}{R}) \times R \quad (7)$$

当两轮中心线间的距离  $R < L$  时, 如图 8b 所示,  $\cos\theta = \frac{L-R}{R}$ 。则驱动距离  $S$  为:

$$S = (\pi - \arccos \frac{L-R}{R}) \times R \quad (8)$$

将  $S$  转换为定量脉冲量后,分阶段驱动右轮左轮,减小机器人与壁面的边距。但因设置了保护距离,旋转电弧的出丝点仍与壁面存在着 30 mm 以内的偏差。

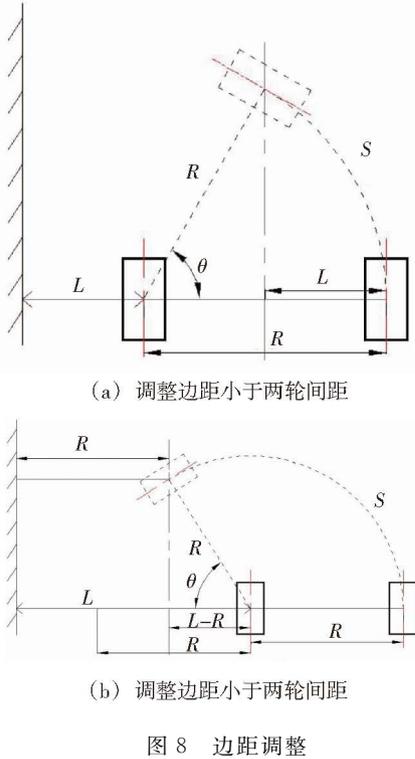


图 8 边距调整

#### 4 焊枪偏差的调整

单目视觉传感器的线性镭射灯发射方向与旋转电弧传感器的伸缩方向平行。且单目视觉传感器安装了 650 nm 窄带宽滤波片和 0.1% 透过率的衰减片,目的是为了过滤焊接过程中弧光的干扰和仅提取出强度高的线结构光<sup>[6]</sup>。

##### 4.1 线结构光截取

当机器人经过边距调整阶段后,采集到的图像如图 9a 所示,为了在图像中增加位置特征点,对镭射灯发射的线性结构光的长度安装挡片进行截取,使 CCD 可以采集到结构光的两端点,反馈电弧与壁面的位置信息,如图 9b 所示。

##### 4.2 中心线提取

中值滤波器是一种非线性滤波器,常用于消除采集到图像的椒盐噪声。与低通滤波器不同,滤波后可以保留图像边缘尖锐部分,同时消去均匀介质中的纹理,较高的保留了后续提取过程中的特征点位置,提高

图像识别精度。使用中值滤波器对图像进行去噪处理,结果如图 10a 所示。

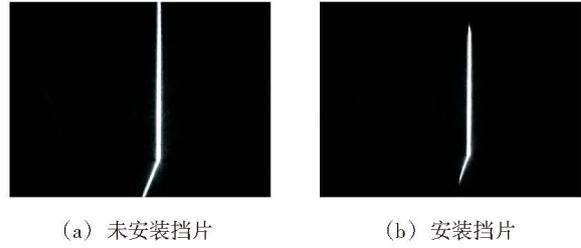


图 9 线结构光截取

采用阈值分割法处理图像时,当像素值高于设定的阈值时,将这个像素设定一个新像素值,否则便将其设定为另一个新像素值,实现图像的二值化。设定阈值为  $thresh$ ,新值为 0 和 255,对线激光进行提取,结果如图 10b 所示,结构光像素点全部转换成灰度值为 255 的像素点。

在多线结构光提取中心线时,常使用 Hilditch 细化算法<sup>[7]</sup>,但其计算量大,不宜在单线结构光图像的实时处理中使用。文中使用重心矩法提取中心线,减小了单帧的处理时间。图像中每行灰度值为 255 的像素点的形心公式为:

$$\bar{x} = \frac{\int_A x dA}{A} \quad (9)$$

将一个灰度值为 255 的像素看成一个  $dA$ ,且为 1 个单位,则图像的面积即为像素点的个数;分子上的积分则变为一行像素坐标之和。对每行目标像素点纵坐标均值数据融合后,设为中心线像素在该行的纵坐标,提取出的中心线如图 10c。

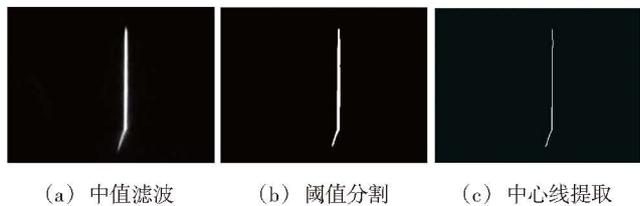


图 10 中心线提取

##### 4.3 端点提取与距离标定

中心线提取的目的是为了提取出结构光的端点。中心线上某点像素在附近 8 邻域中有且只有一个灰度 255 像素时,将该点定义为端点。在图 10c 中,可能存在的点的定义如图 11 所示(1 像素块为灰度值 255 的像素点)。

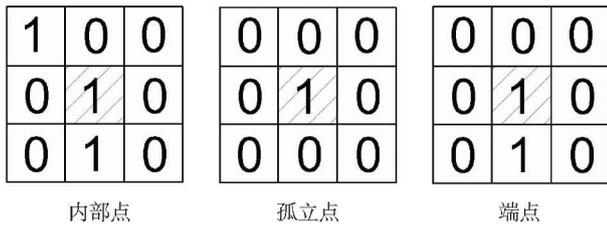


图 11 定义图像中各类型点

对图像进行  $3 \times 3$  掩码逐行扫描,当该点灰度值为 255 时,判断 8 邻域中是否仅有一个中心线像素,当满足条件时,将认定该点为端点,将坐标存储并继续向下扫描,如图 12 所示。

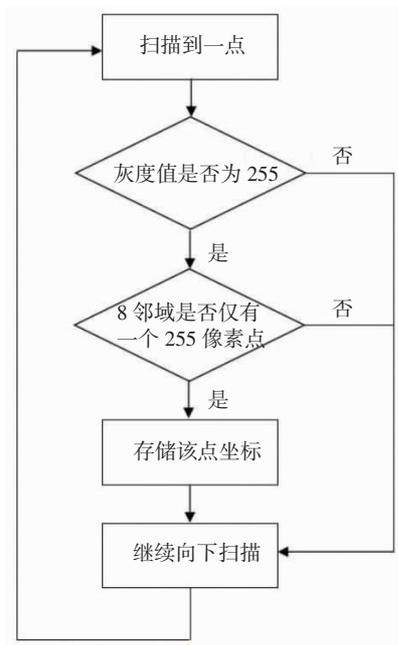


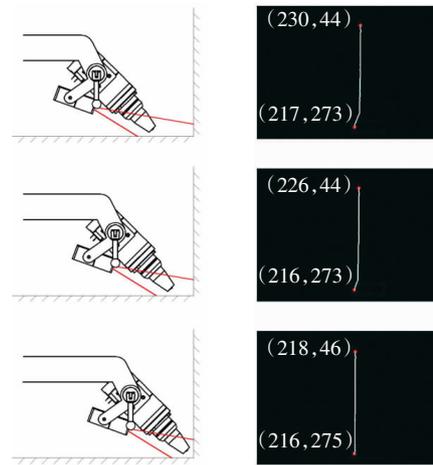
图 12 端点扫描流程图

旋转电弧传感器水平位置调整时,示意图如图 13a 所示,采集到的图像为图 13b 所示。

图像掩码扫描端点是一个自左向右、自上而下的一个过程,图像中位置最高的端点是扫描出的第一个端点。旋转电弧传感器趋近于壁面时,最高位置的端点  $x$  轴坐标递减, $y$  轴坐标递增。单目视觉传感器与焊枪的安装位置固接,在该次试验中经过多次标定,焊枪到达理想位置时,第一个端点的坐标为 (218, 46)。只使用第一个端点可以过滤掉后续扫描中可能因噪声出现的错误信息(端点误判),且避免了因流水孔而造成的中心线截断的问题。

在与壁面的夹角和边距调整过程中,旋转电弧传感器位置一直处于水平滑块的最右限位,机器人驱动旋转电弧传感器伸出的同时监测第一端点的坐标,当

坐标为 (218, 46) 时水平滑块应立即停止。图 14 为机器人的初始姿态和自检定位后的姿态,图 14b 中机器人已到达理想的焊接位置。



(a) 焊枪水平位置调整 (b) 图像提取特征点坐标

图 13 旋转电弧传感器水平位置的调节和对应图像



(a) 初始姿态



(b) 调整结果

图 14 自检调整过程

## 5 结论

平面自主移动机器人焊接初始位置的检测定位分为两个阶段,机器人位姿的角度、边距调整和旋转电弧与焊缝之间的距离调整。角度调整中利用超声波传感器的特点,将扫描得到的数据通过最小二乘法拟合出

距离变化曲线,计算出垂直于壁面时(最小距离)的时间点。边距调整中建立了调整量与电机控制量的数学模型,考虑到机器人与地面间的打滑,调整过程中设置了保护距离。

在焊枪与焊缝距离的调整阶段中,修正了保护距离,并为后续焊接时水平滑块预留了调整空间。利用第一端点的坐标信息,反馈焊枪与壁面之间的距离信息,因此并不需要复杂的标定过程,使平面移动焊接机器人在复杂环境中的自检过程具备了更好的自适应性。解决了焊接初始位置的检测定位问题。

### 参考文献

[1] 李沁溢. 国外先进船体建造技术现状和发展趋向[J]. 造船技术, 2007(5): 9-12, 15.  
[2] 郭亮, 张华, 高延峰. 船舱流水孔自动识别跟踪焊接系统[J]. 焊接学报, 2015, 36(6): 14-18.

[3] 徐跃. 基于超声波测距的机器人定位与避障[D]. 济南: 齐鲁工业大学硕士学位论文, 2013.  
[4] 王殿君. 双目视觉在移动机器人定位中的应用[J]. 中国机械工程, 2013, 24(9): 1155-1158.  
[5] 穆卫谊, 张广鹏, 黄玉美, 等. 移动机器人的超声波传感器发散角标定及应用[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 560-567.  
[6] 郭亮, 张华. 船舱流水孔焊接机器人系统设计[J]. 焊接, 2015(12): 24-26, 31.  
[7] Jiang W H, Yao X D, Guan H R, et al. Carbide behavior during high temperature creep in DZ40M Co-base superalloy [J]. Journal of Materials Science Technology, 1999, 15(6): 515-518.

**作者简介:** 尤帅, 1994年出生, 硕士研究生。主要从事图像焊缝跟踪方面的研究工作。

**通讯作者:** 张华, 1964年出生, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事焊接自动化方面的研究工作。

# 热输入对 Al/TiB<sub>2</sub> 铝基复合材料 激光焊接粒子分布影响

崔海超<sup>1</sup> 荆文<sup>2</sup> 陈哲<sup>1</sup> 芦凤桂<sup>1</sup>

1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240; 2. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028)

**摘要** 采用光纤激光焊接技术,研究了4 mm厚纳米级TiB<sub>2</sub>粒子增强纯铝基体复合材料板材的焊接性能。通过光学显微镜及扫描电子显微镜等方法,分析了焊后纳米级TiB<sub>2</sub>粒子在焊缝中的分布及形态。结果表明,纳米级TiB<sub>2</sub>粒子增强纯铝基复合材料具有较好的焊接性能。激光焊接后焊缝中TiB<sub>2</sub>粒子分布比母材中更加均匀,但当焊接热输入过大时(功率4.0 kW, 1 m/min),TiB<sub>2</sub>粒子有破裂现象,但粒子与基体的结合面界面仍然致密,基本不影响焊缝的性能。

**关键词:** 纯铝基体 TiB<sub>2</sub> 粒子 激光焊 形态

**中图分类号:** TG456.7

## 0 前言

陶铝新材料,即原位生成TiB<sub>2</sub>纳米颗粒增强铝基复合材料,在天宫一号、天宫二号等航空领域推广应

用,同时还在汽车活塞等民用领域获得推广。为获得陶瓷增强铝基复合材料更广范围的应用,其焊接性研究必不可少。铝基复合材料的焊接可采用激光焊、电子束焊、氩弧焊及搅拌摩擦焊等方法,均获得性能较好的焊接接头<sup>[1-5]</sup>。而这些焊接方法中,由于激光焊具有无需添加填充材料及方便灵活等特点,使其在铝基复

收稿日期: 2017-11-10