

# 用于遥控焊接的焊缝特征检测算法

赵慧慧, 梁志敏, 高洪明, 吴 林

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 提出了一种焊缝特征检测算法, 用来进行遥控焊接立体视觉中的立体匹配。首先使用灰度形态学中的底帽变换对图像进行预处理, 突出了焊缝部分, 并通过 Canny 算子边缘检测以及闭操作获得封闭的像素级焊缝边缘, 根据焊缝边缘连续和宽度有限的特点对检测出的边缘点进行筛选, 剔除其中的错误点; 然后对边缘离散点进行三次平滑样条拟合获得连续、光滑的亚像素级精度的焊缝边缘特征点。最后利用检测出的特征点进行焊缝特征立体匹配和三维重建试验, 结果表明, 文中提出的特征检测算法快捷、准确, 且抗干扰能力强。

**关键词:** 遥控焊接; 三维重建; 立体视觉; 焊缝特征检测

**中图分类号:** TG409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2008)12-0064-05



赵慧慧

## 0 序 言

遥控焊接时, 操作者需在远端控制机器人完成任务。传统的遥控操作控制方式过于依赖操作者, 效率低下。利用机器人自动化可提高效率, 但需先为其提供计算机能理解的环境三维模型, 即需要通过传感进行任务空间的三维重建。对于遥控焊接来说, 焊缝轨迹是焊接时焊枪末端的行走路径, 焊缝的三维重建是最为关键的部分。基于立体视觉的三维重建应用广泛, 将其应用于焊缝的三维重建, 首先检测焊缝特征在图像上的位置, 然后再进行立体匹配和计算三维坐标。可见, 对焊缝进行检测是后续步骤的基础, 尤为重要, 该部分如果检测精度不高会直接导致匹配结果偏差和重建结果的不理想。

哈尔滨工业大学的李金泉<sup>[1]</sup>采用手眼式摄像机, 以一目两位的立体视觉进行焊缝三维信息的获取。李金泉使用的是基于 Zernike 矩的亚像素直线边缘提取算法, 是利用 Zernike 矩在局部坐标系中计算边缘点所在直线方程, 对于所求出的直线参数在参数空间对参数单元投票取阈值提取直线。所以该算法本质上是将焊缝局部近似为直线段来处理的。此外采用机器人末端安装摄像机的一目两位式近距离拍摄图像的方法并不适合在遥控焊接中使用。类似的, 清华大学金建敏<sup>[2]</sup>建立了以自然光为光源的双目立体视觉机器人路径规划系统, 金建敏认为坡口

边缘内外不存在明确的特征点无法使用特征点匹配法, 也将焊缝近似为直线段处理。但实际焊缝大多都是曲率连续变化的, 将其当作直线处理会引入误差, 影响系统的准确度。

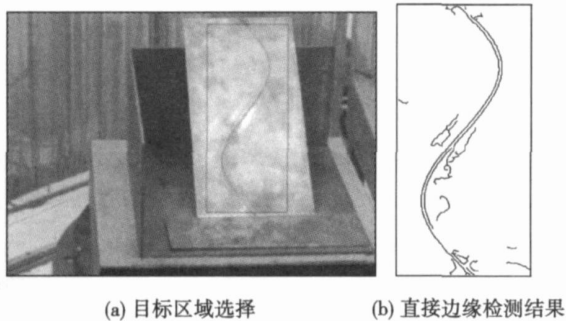
文中提出的焊缝检测算法具有如下特点: (1) 采用底帽变换灰度形态学预处理突出了焊缝部分, 消除了背景和噪声的影响; (2) 将焊缝作为三次平滑样条曲线处理, 这样不仅满足了焊缝曲线曲率变化连续的要求, 且提取曲线焊缝, 尤其是空间曲线焊缝特征时更接近事实。焊缝检测算法主要分为以下三个步骤: (1) 形态学图像预处理以及像素级焊缝特征检测; (2) 分离左右边缘, 并进行连续性和宽度有限的判断, 筛选像素级特征点; (3) 三次平滑样条拟合。下面针对具体步骤做详细介绍。

## 1 形态学处理及像素级焊缝特征检测

在遥控焊接中, 为了提高效率, 可以使用人机交互。以 S 形焊缝为例, 首先选择目标区域如图 1a 所示, 以减小数据量, 避免误检测, 如果直接对目标区域进行 Canny 算子边缘检测, 结果如图 1b 所示, 由于受噪声以及工件表面光泽不均的干扰, 检测结果不理想。为了获得比较好的结果, 文中采用灰度形态学方法对目标区域进行预处理。

数学形态学的基本思想是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状以达到对图像分析和识别的目的。数学形态学主要包括二值形

态学和灰度形态学,分别用以处理二值图像和灰度图像<sup>[3]</sup>。



(a) 目标区域选择

(b) 直接边缘检测结果

图 1 目标区域选择以及使用 Canny 算子边缘检测结果  
Fig. 1 Interest region choice and Canny edge detection result

### 1.1 灰度形态学的基本操作

灰度形态学的基本操作包括膨胀、腐蚀、开操作和闭操作<sup>[3]</sup>。设  $f(s, t)$  为输入图像,  $b(x, y)$  为结构元素,  $D_f$  和  $D_b$  分别是  $f$  和  $b$  的定义域, 则  $f$  的主要灰度形态学变化定义如下。

用  $b$  对函数  $f$  进行灰度膨胀表示为  $f \oplus b$ , 即

$$(f \oplus b)(s, t) = \max\{f(s-x, t-y) + b(x, y) \mid (s-x), (t-y) \in D_f; (x, y) \in D_b\} \quad (1)$$

用  $b$  对函数  $f$  进行灰度腐蚀表示为  $f \odot b$ , 即

$$(f \odot b)(s, t) = \min\{f(s+x, t+y) - b(x, y) \mid (s+x), (t+y) \in D_f; (x, y) \in D_b\} \quad (2)$$

用同一结构元素对图像腐蚀后再膨胀称为开操作。用结构元素  $b$  对图像  $f$  进行开操作表示为  $f \circ b$ , 即

$$f \circ b = (f \odot b) \oplus b \quad (3)$$

与上述处理顺序相反的过程, 即先膨胀后再腐蚀, 称为闭操作。用结构元素  $b$  对图像  $f$  进行闭操作表示为  $f \bullet b$ , 即

$$f \bullet b = (f \oplus b) \odot b \quad (4)$$

形态学中的四种基本操作均能对图像进行平滑滤波, 其中腐蚀和开操作能消除图像边缘不光滑的尖峰、凸起以及切断细小连通, 膨胀和闭操作能填充图像边缘不光滑的凹陷及内部小孔。腐蚀使图像边缘缩小, 膨胀使图像边缘扩大, 开操作和闭操作使图像边缘大小基本保持不变。开操作和闭操作都能消除比结构元素小的物体, 开操作是除去比周围亮的物体, 而闭操作是除去比周围暗的物体。

### 1.2 顶帽(top-hat)变换与底帽(bottom-hat)变换

top-hat 变换与 bottom-hat 变换都属于灰度形态学的应用, 下面分别对其定义进行介绍<sup>[4]</sup>。

经过开操作处理的图像中每个像素灰度值不会

高于原图像, 并且比结构元素小的亮物体会被开操作的结构元素抹去。所谓的 top-hat 变换就是原图和开操作图像之间的差别, 即

$$\text{tophat}(f, b) = f - (f \circ b) \quad (5)$$

由 top-hat 变换的定义可知, 该操作能提取比结构元素小的亮物体。

经过闭操作处理过的图像, 每个像素的灰度值都不小于原图中的灰度值。所谓的 bottom-hat 变换就是闭操作图像和原图之间的差, 即

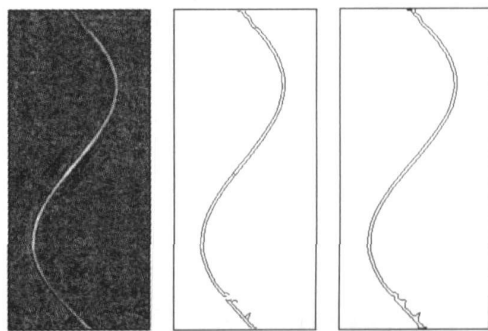
$$\text{bothat}(f, b) = f \bullet b - f \quad (6)$$

由 bottom-hat 变换的定义可知, 该操作能提取比结构元素小的暗物体。

一般情况下, 焊接工件上焊缝部分的反光性能要低于非焊缝部分, 也就是说, 在图像上焊缝部分较非焊缝部分暗, 而且焊缝多为细小结构。由 top-hat 变换和 bottom-hat 变换的定义和特点可知, bottom-hat 变换恰好可以将工件部分的背景信息滤去, 使焊缝部分突出。

### 1.3 像素级焊缝特征检测

图 2a 是对图 1a 中的目标区域进行 bottom-hat 变换之后的结果, 然后再对其进行 Canny 算子边缘检测, 结果如图 2b 所示, 对比图 1b 可知使用底帽变换的作用十分明显。从图 2b 可见, Canny 边缘检测结果中焊缝边缘出现了小的断裂, 为了获得连续的边缘, 需要对其进行修补, 考虑闭操作可以修补细小开口以及填充凹坑的特点, 因此对其进行闭操作, 再次提取边缘获得如图 2c 所示的结果。



(a) 底帽变换结果

(b) 边缘检测结果

(c) 闭操作的结果

图 2 焊缝的像素级提取结果

Fig. 2 Detected pixel level results of welding seam

## 2 像素级数据点的筛选

上述焊缝边缘检测虽然获得了连续的像素级焊缝边缘, 但仍有少部分边缘点偏离了焊缝边缘, 并出

现了较为剧烈的起伏和突变,为此,需要对其进行筛选,将错误点剔除。

观察实际的焊缝图像边缘,可以认为一般情况下,焊缝边缘有以下两个特点:(1)焊缝边缘连续的特点。真实的焊缝图像边缘是连续的,检测出的边缘点也不应该发生突变。(2)焊缝边缘宽度有限的特点,即两边缘之间的距离不能超过某一阈值。针对这两个特点,文中对上一步骤检测结果进行数据点筛选的算法步骤如下。

(1)根据图像灰度梯度方向分离左右边缘。

(2)采用分段计算均值的方法计算出中线数据点坐标。

(3)对左右边缘点分别进行排序,并根据焊缝边缘连续的特点去除排序后与前一边缘点距离超过某一阈值的点。

(4)将边缘点与中线数据点按纵向坐标数据的大小进行排序,并根据焊缝边缘宽度有限的特点,去除与中线距离大于某一阈值的边缘点。

其中步骤(2),(3),(4)可以针对数据的具体情况重复使用。

### 3 三次平滑样条曲线拟合

利用上述步骤获得的像素级焊缝边缘特征点计算视差和焊缝三维坐标时误差很大,这是由于连续变化的深度信息被离散成整数级坐标造成的,为了提高准确度需要将数据精确到亚像素级。而另一方面,由上一步得到的焊缝边缘局部有少许断裂、曲率不连续或者较小突变的点,需进行数学上的平滑处理。

从数学上讲,样条曲线是用分段多项式表示的一个函数,可以提供曲线的通用表示形式,且在其连接点处具有连续的一阶和二阶导数,能够满足焊缝边缘曲率变化连续的需要,其中最常见的形式是三次样条函数。

三次样条曲线是具有光滑性的分段三次多项式,要使每段的定义都能保证函数及其前两阶导数连续,在其节点  $x_i, i=1, \dots, n$  (令  $x_0=-\infty, x_{n+1}=\infty$ ), 定义三次样条曲线  $f(x)$  为

$$f(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3 \quad (x_i \leq x < x_{i+1}) \quad (7)$$

且满足以下约束,即

$$\left. \begin{aligned} a_{i-1} + b_{i-1}x + c_{i-1}x^2 + d_{i-1}x^3 &= a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3 \\ b_{i-1} + 2c_{i-1}x + 3d_{i-1}x^2 &= b_i + 2c_i x + 3d_i x^2 \\ 2c_{i-1} + 6d_{i-1}x &= 2c_i x + 6d_i x \\ c_0 = d_0 = c_n = d_n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

如果令曲线经过每一个点,由于数据误差,可能产生摆动曲线,样条平滑方法避免了这种现象,使它在较好的数据符合与不产生局部突变这两个目标下产生一个平衡,其目标函数为<sup>[5]</sup>

$$S(p) = p \sum_i \{y_i - f(x_i)\}^2 + (1-p) \int f''(x)^2 \quad (9)$$

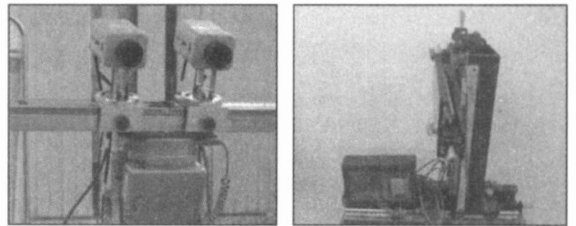
式中:平滑参数  $p$  是控制最小化残差和最小化局部突变之间的折中。当  $p$  等于 1 时,残差最小化,这时就是三次样条内插,当  $p$  为 0 时,函数粗糙度最小化,相当于  $y$  在  $x$  上的线性回归,即最小二乘直线。当  $p$  在 0 和 1 之间时,最小化  $S(p)$  的曲线就是三次平滑样条。

对焊缝的左右边缘点分别进行三次平滑样条拟合,不仅去除了残余的少数错误点,使焊缝边缘数据点的曲率变化连续,而且将像素级的坐标精确到亚像素级,为高准确度的立体匹配提供了条件。

## 4 试验验证

### 4.1 试验系统

试验中使用的立体视觉系统如图 3 所示,图像采集卡选用北京大恒图像公司的 CG 300 彩色图像采集卡,该系统已经进行了标定<sup>[9]</sup>。为了验证误差,试验中使用一台三坐标测量仪来测量真实焊缝位置,如图 3b 所示,并将三坐标测量仪的坐标系作为世界坐标系。对于已经进行了立体校正的图像对进行立体匹配时,仅仅沿着图像的同一扫描线进行搜索就可以了。特征匹配以后,利用立体视觉原理就可以获得特征点的三维坐标<sup>[7]</sup>。试验中摄像机距离焊缝约 1.7 m,摄像机焦距约为 16 mm,基线长度 215.98 mm。



(a) 双目视觉系统

(b) 三坐标测量仪

图 3 试验系统

Fig. 3 Experimental system

### 4.2 试验结果

分别对 S 形焊缝和圆筒对接形式的焊缝进行建模试验,结果如图 4 和图 5 所示。其中图 4a 和图 5a

为左侧摄像机采集的焊缝原始图像; 图 4b 和图 5b 为相应的焊缝特征检测结果; 图 4c 和图 5c 是检测出的焊缝两个边缘的点云数据显示; 图 4d 和图 5d 是焊缝两边缘进行 NURBS 曲线拟合<sup>[8]</sup>后求得的焊缝中心曲线结果与三坐标测量仪实测点的比较。

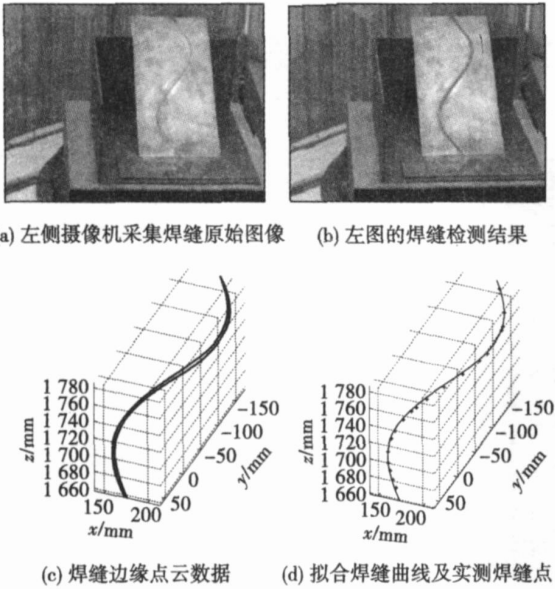


图 4 S 形焊缝的试验结果

Fig. 4 Experimental results of S-shaped weld seam

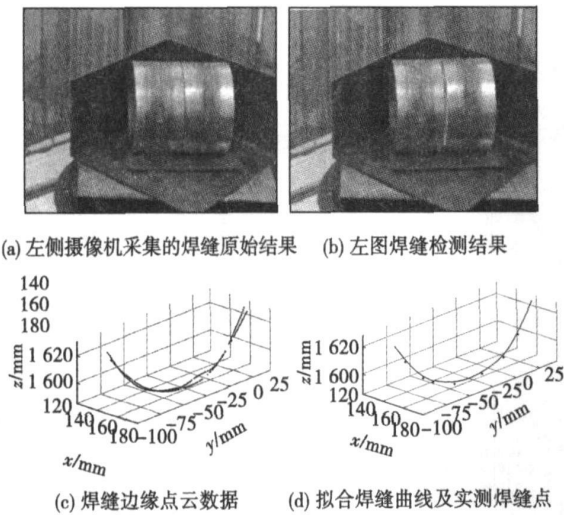


图 5 圆筒对接焊缝的试验结果

Fig 5 Experimental results of weld seam of cylinder butt joint

### 4.3 试验结果分析

焊缝检测精确度对整个立体视觉系统来说是极为重要的, 但却很难直接衡量。试验中焊缝检测误差是通过焊缝三维重建结果来判断的, 三坐标测量仪测得的焊缝真实数据都是离散的空间点, 而立体

视觉重建得到的焊缝模型为焊缝中心曲线模型。文中暂不考虑焊缝的宽度影响, 只计算焊缝真实点到焊缝中心曲线上对应最近点的距离。由于直接在 NURBS 曲线上寻找与真实点的距离最近点需要迭代, 所以采用近似的方法, 在 NURBS 曲线上很密集的选取等距的采样点, 然后分别计算真实点到各个采样点的距离, 取其中距离最小的点来计算误差, 分别采用四个量进行表示, 即真实点到曲线最近点的  $x, y, z$  方向的绝对定位误差的绝对值, 以及绝对定位距离误差。得到的 S 形焊缝和圆筒对接焊缝的重建误差结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 S 形焊缝的误差结果 (mm)

Table 1 Error results of S shaped weld seam

焊缝点序号	$ \delta_x $	$ \delta_y $	$ \delta_z $	距离 $L/mm$
1	0.59	0.16	2.57	2.89
2	0.04	0.62	1.58	1.70
3	0.21	0.55	1.05	1.20
4	0.19	0.33	0.98	1.05
5	1.04	0.08	0.67	1.24
6	0.86	0.15	0.64	1.09
7	1.34	0.33	0.85	1.62
8	1.37	0.79	1.27	2.02
9	1.44	0.22	1.20	1.89
10	1.11	0.44	1.08	1.61
11	0.57	0.09	1.20	1.33
12	0.87	0.17	1.16	1.46
13	0.38	0.75	0.99	1.30
14	0.41	0.55	0.98	1.19
15	0.56	0.39	1.03	1.23
16	0.08	0.24	0.09	0.27
17	0.76	0.35	1.33	1.58
18	1.00	0.56	0.58	1.26
19	1.15	0.12	2.05	2.36
平均误差	0.73	0.42	1.12	1.49

需要指出, 表中所示的误差为系统总体误差, 是系统标定误差、摄像机坐标系与世界坐标系转换误差、焊缝特征检测与匹配误差以及拟合误差等多误差的综合结果。其中系统标定的平均绝对定位距离误差为 0.87 mm, 可见, 焊缝检测部分的误差较小, 焊缝建模方法获得的焊缝模型准确度较高。文中的焊缝特征检测算法可满足遥控焊接环境下, 机器人实际焊接前任务规划系统所需要的焊缝宏观建模时焊缝特征检测准确度的要求。

表 2 圆筒对接焊缝的误差结果(mm)

Table 2 Error results of cylinder butt joint welding seam

焊缝点序号	$ \delta_x $	$ \delta_y $	$ \delta_z $	距离 $L$
1	0.17	0.50	1.02	1.15
2	0.12	0.28	1.47	1.50
3	0.01	0.30	1.24	1.28
4	0.12	0.96	1.15	1.50
5	0.04	0.68	0.74	1.01
6	0.01	0.56	1.02	1.16
7	0.15	0.91	1.76	1.99
平均误差	0.09	0.60	1.20	1.37

## 5 结 论

提出了一种用于遥控焊接中的焊缝特征检测算法。该算法使用灰度形态学方法对图像进行预处理,突出了焊缝部分,通过 Canny 算子边缘检测以及闭操作,很好的检测像素级焊缝特征。然后依据焊缝的连续性和宽度有限的特征点筛选去除错误点。最后,使用三次平滑样条曲线拟合获得光滑的亚像素级精度的焊缝特征。使用该算法分别对两种类型焊缝进行特征检测,并对其进行了焊缝建模试验。结果表明,该焊缝特征检测算法速度快、边缘定位准确且具有较强的抗噪声干扰能力,获得了较高的准

确度。

## 参考文献:

- [1] 李金泉. 基于视觉弧焊机器人焊缝空间位置信息获取技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
- [2] 金建敏. 弧焊机器人焊接路径预规划的研究[D]. 北京: 清华大学, 1996.
- [3] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 阮秋琦 阮宇智, 等译. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] Movafeghi A, Taheri M, Kargamovin M H, *et al.* Quality improvement of digitized radiographs by filtering technique development based on morphological transformations[C] // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Italy: Rome, 2004, 10: 1845-1849.
- [5] Baird D. Procedures for fitting Cubic Smoothing Splines[EB/OL]. <http://www.ssc.upenn.edu/~vr0j/ec714-99/sp1-doc.pdf>.
- [6] 梁志敏, 高洪明, 张广军, 等. 遥控焊接中立体视觉系统标定[J]. 焊接学报, 2006, 27(9): 103-107.
- [7] 马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] 何广忠. 机器人弧焊离线编程系统及其自动编程技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

作者简介: 赵慧慧, 女, 1984 年出生, 博士。研究方向为用于遥控焊接的立体视觉焊缝建模研究。

Email: zhaohuihui841203@sina.com

[上接第 63 页]

纹, 即热裂纹, 这可能导致钎料焊点可靠性的下降。

(2)设计的试验试件可以重现无铅钎料钎焊过程产生的结晶裂纹, 实现对无铅钎料结晶裂纹的物理模拟, 采用平均结晶裂纹总长度定量地评价无铅钎料结晶裂纹的敏感倾向, 为正确选择和使用钎料合金, 保证钎焊接头的可靠性提供有价值的参考依据。

(3)添加 Ni 和 Ce 元素对 SAC305 合金的结晶裂纹有比较明显的抑制作用, 而添加 P 元素却能加剧结晶裂纹的形成。

## 参考文献:

- [1] 邹 慧. 无铅焊点的可靠性研究[J]. 中国民航大学学报, 2007, 25(3): 49-52.
- [2] 王豫明, 王蓓蓓, 崔增伟. 无铅电子产品可靠性[J]. 电子测

试, 2007(9): 22-31.

- [3] Biocca Peter. Tin-copper based solder options for lead-free assembly [J]. Global SMT & Packaging, 2006(11/12): 23-25.
- [4] Blattau N, Hillman C. A comparison of the isothermal fatigue behavior of Sn-Ag-Cu to Sn-Pb solder [C] // Comparison of the Isothermal Fatigue Behavior of Sn-Ag-Cu to Sn-Pb. IPC/APEX, Anaheim, CA, 2006: 7-10.
- [5] 樊艳丽, 张柯柯, 王要利, 等. Ni 对 SnAgCuRE 钎料及其钎焊接头性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(8): 651-654.
- [6] Chen Z G, Shi Y W, Xia Z D, *et al.* Study on the microstructure of a novel lead-free solder alloy SnAgCu-RE and its soldered joints [J]. Journal of Electronic Materials, 2002, 31(10): 1122-1128.
- [7] 史耀武. 材料焊接工程(上)——中国材料工程大典: 第 22 卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

作者简介: 董文兴, 男, 1981 年出生, 硕士研究生。主要从事先进电子材料的研究工作。发表论文 5 篇。

Email: dongwenxing@emails.bjtu.edu.cn

010051, China; 2. Baotou North Engineering Development Co., Ltd, Baotou 014033, China). p57–60

**Abstract:** The 7A52 aluminum alloys of 40mm in thickness were welded by using Twin-wire gas shielded arc welding (DWGSAW) with ER5356 filler, and the microstructure of the weld seam was analyzed. Meanwhile, according to the actual application environment, the base metal and the weld seam were studied in 3.5% NaCl solution after welding. Results show that the microstructure of the seam welded by DWGSAW is composed of  $\alpha$  (Al) +  $\beta$  (MgZn<sub>2</sub>), which the crystal grain is compact and petty, and the center of the weld is equiaxed grain. The corrosion resistance of 7A52 aluminum alloy is liable to pitting corrosion in humid environment containing chloride ion. However, a thin and condense aluminum oxide film is formed on the corroded surface, which is beneficial to increasing the corrosion resistance of the 7A52 aluminum alloy. The corrosion resistance of the weld seam is better and the pitting corrosion is rare on the corroded surface.

**Key words:** 7A52 aluminum alloy; double-wire gas shielded arc welding; microstructure; corrosion resistance

**Solidification crack of SnAgCu lead-free solder joint** DONG Wenxing, SHI Yaowu, XIA Zhidong, LEI Yongping, GUO Fu, LI Xiaoyan (School of Materials Science & Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). p61–63, 68

**Abstract:** In order to investigate solidification crack of SnAgCu solder joint on the print circuit board (PCB), solidification cracks during solidification are regenerated, the process of the solidification crack formation on the designed specimen is simulated, and the effect of the small element additions on the solidification crack formation of SnAgCu solder joint is researched. Experimental results indicate that some solidification micro-cracks exist significantly on the mini SnAgCu solder joint. The solidification crack susceptibility of Sn-Ag-Cu solder alloy is evaluated by the total crack length of the solder joint, adding trace amounts of Ni and Ce element can depress the solidification crack formation of the solder joints, but adding P element can aggravate the solidification crack formation of SAC305 solder joint and make the crack length evidently increase.

**Key words:** lead-free solder; SnAgCu solder; solidification crack

**Algorithm of weld seam feature detection for remote welding**

ZHAO Huihui, LIANG Zhimin, GAO Hongming, WU Lin (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p64–68

**Abstract:** An algorithm of weld seam feature detection was presented, which was applied to stereo matching of stereo vision system for remote welding. Firstly, the bottom-hat transformation in grey-scale morphology was used to preprocess the image, making the weld seam section more distinctive, and Canny edge detection and close operation were employed to obtain a pixel level closed edge of weld seam; secondly, the edge data was filtered according to continuity and limited width of the weld seam edge; finally, the sub-pixel weld seam edge data was gained by fitting a cubic smoothing spline

to the filtered edge data. With the detected sub-pixel weld seam, stereo matching and 3D reconstruction experiments were performed. The results show that the algorithm is rapid, exact and robust to noises.

**Key words:** remote welding; 3D reconstruction; stereo vision; weld seam feature detection

**Effect of relative position of laser beam and arc on formation of weld in laser-MIG hybrid welding**

GAO Zhiguo, HUANG Jian, LI Yaling, WU Yixiong (Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). p69–73

**Abstract:** In order to weld high reflectivity aluminum alloy 5083H116 by laser-MIG hybrid welding process, the effects of the front and behind relative position of laser beam and arc on the formation of weld were analyzed. The laser beam incidence angle will seriously affect the weld formation both surface and inside corresponding to different formation mechanism. When the laser beam is in front of the arc in the welding direction, the weld surface is full uniform. While the arc is in front of the laser beam in the welding direction, the inclined trench will appear on the weld surface. With the help of EDX and micro hardness analysis, the Mg content shows a gradual increase from the weld upside surface to the underside surface, but the weld hardness is slight difference. The weld hardness of upside is less than that of underside for the laser beam in front of the arc in the welding direction; the weld hardness of upside is higher than that of underside for the arc in front of laser beam in the welding direction. Meanwhile, there is the black substance on the weld surface after welding, and it is confirmed as oxide of aluminum and magnesium by the EDX.

**Key words:** aluminum alloy; weld formation; laser-MIG hybrid welding; laser incidence angle

**Structure and electrochemistry corrosion behaviors of microarc oxidation on aluminum**

WANG Zhiping<sup>1</sup>, SUN Yubo<sup>1</sup>, DING Kunying<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, CAI Xun<sup>2</sup> (1. College of Sciences, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). p74–76

**Abstract:** The thick, dense and ultra-hard ceramic coating was obtained on the aluminum surface in a silicate electrolyte by microarc oxidation. The surface morphology and cross section of ceramic coating were observed by SEM, the hardness and Young's modulus of ceramic coating were estimated by nano-hardness tester, and the electrochemistry corrosion behaviors of ceramic coating were evaluated using polarization curves. The results show that the highest surface hardness of ceramic surface coating is 25.3 GPa; the hardness and Young's modulus of cross section of coating distribute similarly, both of them decrease from interface to surface of the coating; from the results of electrochemistry, microarc oxidation is effective method to form an anti-corrosion protective film on aluminum.

**Key words:** aluminum; microarc oxidation; ceramic coating; electrochemistry corrosion behaviors