

# 铝合金双丝 MIG 焊熔池图像采集与处理

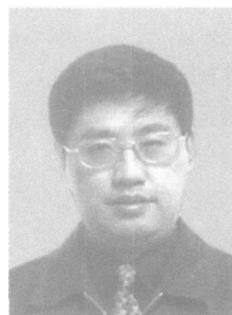
王克鸿, 贾 阳, 钱 锋, 沈莹吉\*

(南京理工大学 材料科学与工程系, 南京 210094)

摘 要: 针对铝合金双丝熔化极氩弧焊, 分析研究了电弧弧光辐射和熔池视觉传感的特征。结果表明, 双丝电弧辐射更强, 采用近红外窄带滤波传感熔池视觉传感双丝熔池相对易于提高信噪比, 在 10~35 mm 厚 LY12 和 7A52 铝合金 V 形坡口对接焊缝工艺试验的基础上, 采用 980 nm 窄带滤波和合适的减光系统获得了较为清晰的铝合金双丝熔池视觉图像, 分析了双丝熔池视觉图像特征, 采用自动阈值分割等方法设计了计算机图像专用处理软件, 获得了准确的双丝熔池边界及几何参数, 为基于熔池视觉的铝合金 MIG 焊质量控制打下良好基础。

关键词: 双丝 MIG 焊; 熔池; 近红外视觉传感; 图像处理

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)01-053-04



王克鸿

## 0 序 言

双丝焊作为高效化的焊接方法, 是目前国内外焊接界研究和推广的热点之一, 其高效焊接技术主要表现在两个方面: 一是薄板焊时焊接速度的提高; 二是中厚板焊接时熔敷效率和质量的大幅提高。双丝 PMIG 焊接参数众多, 协调更为复杂, 焊接熔池几何特征、流动状态等与单丝焊有明显区别, 对焊接熔池过程研究相对要少得多, 目前国内外对碳钢单丝 GMAW 熔池视觉方面的研究较多<sup>[2-5]</sup>, 但是对铝合金熔池视觉的研究很少, 对铝合金双丝 MIG 焊熔池的图像传感尚未见研究报道, 作者主要研究双丝焊熔池视觉图像传感采集及其轮廓的提取。

## 1 铝合金双丝 MIG 焊电弧光谱分析

双丝 MIG 焊作为 GMAW 的一种, 其电弧光谱辐射是线光谱辐射和连续谱辐射的叠加<sup>[1]</sup>, 光谱分布与单丝 MIG 基本相同, 双电弧辐射覆盖了从紫外光到红外光区域, 紫外光区的波长分布在 10~390 nm, 可见光区的波长分布在 390~770 nm, 紫外和可见光强度极大, 电弧的红外光辐射极低, 至中红外弧光光强几乎为零。对双丝 MIG, 两个电弧相距 18 mm 很接近, 两个 MIG 电弧弧光叠加, 双弧弧光交替相互

影响, 在可见光段选择弧光辐射弱而金属线光谱辐射强的波段将更为困难, 特征谱窄带滤光窗口的选取极为不易, 且对焊接工艺参数更为敏感。熔池图像信噪比的描述如下<sup>[3]</sup>。

$$\eta = \frac{\sum J + \sum F + \sum Z}{\sum Q + \sum L}, \quad (1)$$

式中:  $\sum J$  为取像窗口内金属特征谱总和;  $\sum F$  为取像窗口内熔池对电弧的反射光总和;  $\sum Z$  为取像窗口内熔池自身辐射光的总和;  $\sum Q$  为取像窗口内电弧氛围中保护气体的特征谱总和;  $\sum L$  为取像窗口内电弧的连续谱总和。由式(1)可看出, 与单丝 MIG 弧一样, 双丝 MIG 熔池取像仍以采用红外波段较为理想, 弧光在 4 000 nm 以外的中远红外波段几乎不存在<sup>[2]</sup>, 在近红外光区波长(770~1 500 nm)区域, 双弧弧光辐射较弱, 但双弧弧光较单弧要强, 使近红外光波段信噪比也有所下降, 双丝对熔池视觉传感滤减光系统要求更为严格。作者对近红外和可见光波段选择滤光系统进行试验研究, 以获得清晰的双丝熔化极熔池视觉图像。

## 2 铝合金双丝 MIG 焊熔池图像传感

### 2.1 图像采集系统设计

铝合金双丝 MIG 焊熔池图像采集存在双弧光强叠加, 弧光更为强烈, 信噪比变低, 且铝合金对弧光的反射也较强, 拍摄图像滤除电弧光干扰更为困难; 其次, 铝合金材料热导率高, 熔池区至母材的温

度梯度比碳钢熔池要小, 双丝 MIG 焊时情况更为严重, 使得熔化区和母材区的灰度梯度较小, 熔池两侧边界较难分辨; 特别是熔池熔化区与熔池尾部的半凝固区之间的温度梯度更小, 所以熔池熔化区尾部边界的清晰度变差, 单丝 MIG 的 1 064 (980) 滤光 + 1% 减光的技术方案将难以取得清晰的熔池图像, 试验建立的传感采集系统示意如图 1 所示, 其中采用的双丝焊机是法国 SAF 双丝自动焊接系统, 其结构示意图如图 2 所示, 图像采集模块包括近红外 CCD 摄像机、窄带复合滤光系统、大焦距镜头、图像采集卡等。先对铝合金双丝 MIG 焊平板堆焊进行采集试验, 试验不同的滤光和减光组合, 确定最佳的取像窗口, 即最佳的滤光减光片组合。试验采用的母材为 10 ~ 35 mm 厚 LY12 和 7A52 铝合金板, 直径 1.2 mm 的 S331 焊丝, 纯 Ar 保护气, 针对 V 形坡口和平板堆焊都进行了试验, 采用直流反接。先后使用中心波长为 405 nm, 520 nm, 611 nm, 820 nm, 980 nm 和 1 064 nm 的窄带滤光片, 配合 805 截止滤光和 0.1% 的中性减光片组成滤光系统 (主要技术参数见表 1), 进行了多组试验。试验表明: 采用 405 nm, 520 nm, 611 nm 等 820 nm 以下的窄带滤光片不能有效滤除强烈的电弧光, 熔池区被弧光全部覆盖, 而采用 1 064 nm 时较多的滤除了熔化区金属的辐射光谱, 使得图像中熔化区与母材区难以区分, 只

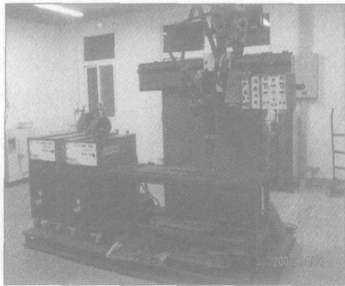


图 1 双丝焊系统实物

Fig. 1 Object of twin wire welding system

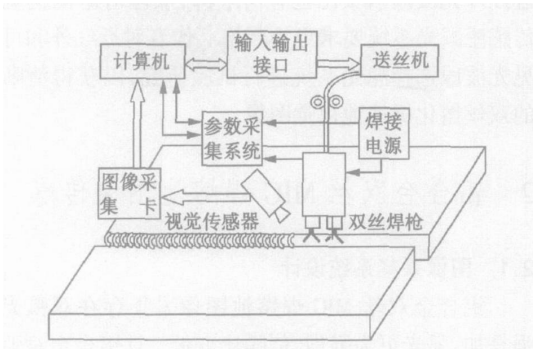


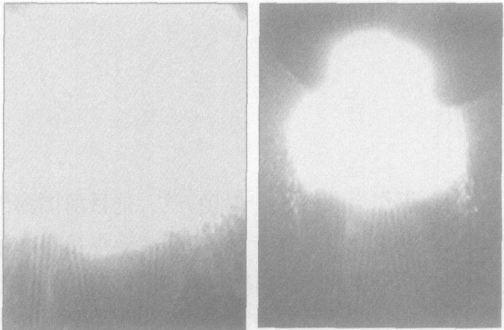
图 2 双丝焊熔池图像采集系统

Fig 2 Twin wire welding molten pool image gathering system

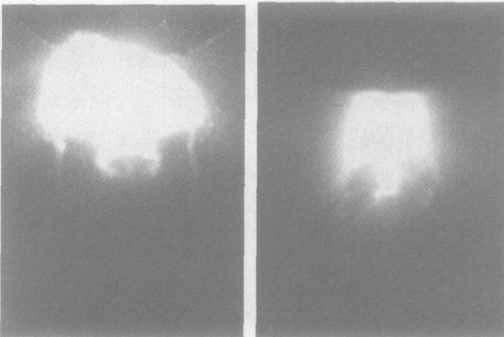
能分辨电弧区。采用 980 nm 滤光片时, 两侧边界清晰, 可见浮渣区, 拍摄效果相对最好。主要图像如图 3 所示, 通过试验确定了 980 nm 窄带滤光片 + 805 nm 截止滤光 + 配合 0.1% 中性减光片为最佳取像窗口。

表 1 复合滤光片的主要技术参数  
Table 1 Main technique parameter of composite filter

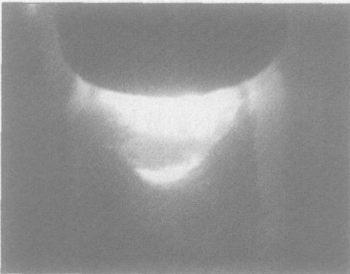
取像机理	窄带滤光片			
	中心波长 <i>e</i> /nm	半带宽 <i>d</i> /nm	峰值 通过率(%)	中性减光 片通过率(%)
近红外 区滤光	1 064	10	37	0.1
	980	10	25	0.1
	820	10	30	0.1
可见光 区滤光	611	7	50 ~ 70	0.1
	520	8	50	0.1
金属特征谱	405	8.9	42	0.1



(a) 450 nm (b) 611 nm



(c) 820 nm (d) 1 064 nm



(e) 980 nm

图 3 不同滤光片拍摄图像对比

Fig 3 Images under different filters

双丝熔化极氩气体保护焊, 在各种焊接工艺参数条件下研究了熔池图像传感采集试验, 在可见光滤波段, 拍摄到的图像效果不是很好。

2 2 熔池图像采集试验

采用 980 nm 窄带滤光片 + 805 nm 截止滤光 + 0.1% 中性减光片, 进行双丝熔化极气体保护焊熔池视觉传感试验, 母材和焊接工艺见表 2, 熔池视觉图像见图 4。从图 4 中可以清楚直观地看到熔池后部的情况, 熔化区与母材的对比度较高, 熔池轮廓清晰,

可以进行图像处理获得熔池边界及其它特征信息。

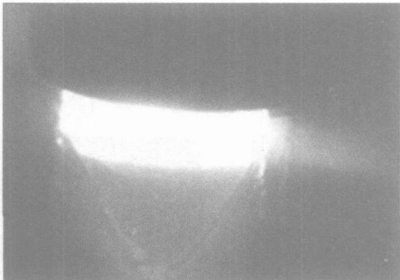
该图像是 35 mm 厚对接打底焊条件下拍摄到的 V 形坡口熔池, 为了验证采集系统对其它材质、坡口类型和厚度的铝合金熔池视觉传感的适应性, 进行了 6061 和 5083 铝合金平板对接接头熔池图像采集试验。试验工艺条件如表 3, 所采集的视觉图像如图 5 所示, 电弧没有全部覆盖熔化区, 熔池尾部边界清晰, 可以进行图像处理提取边界, 进而提取熔宽、熔池面积等参数。

表 2 35 mm 铝合金双丝焊打底层参数表  
Table 2 Twin wire welding parameter of 35 mm aluminum alloy

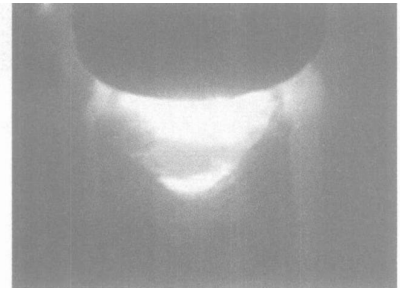
参数	焊接速度 $v_1/(cm \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_2/(m \cdot min^{-1})$	焊接电流 $I/A$	电弧电压 $U/V$	保护气	保护气流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	母材	焊丝	接头坡口	间隙 $h/mm$
主机	50~70	7~10	180~240	21~23	99.99% 纯氩	25	7A52 35 mm	5A56 $\Phi 1.6$	双 V70°	钝边 2~3
副机	50~70	7~10	180~240	21~23	99.99% 纯氩	25	7A52 35 mm	5A56 $\Phi 1.6$	双 V70°	钝边 2~3

表 3 6061 和 5083 异种铝合金对接焊中间层参数表  
Table 3 Butt welding parameter of 6061 aluminum alloy and 5083 aluminum alloy

参数	焊接速度 $v_1/(cm \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_2/(m \cdot min^{-1})$	焊接电流 $I/A$	电弧电压 $U/V$	保护气	保护气流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	母材	焊丝	接头坡口	间隙 $h/mm$
主机	45	9.4	215~235	24~25	99.99% 纯氩	25	6061 和 5083	5183 $\Phi 1.6$	I 型	钝边 1~1.5
副机	45	10	250~270	22~23	99.99% 纯氩	25	6061 和 5083	5183 $\Phi 1.6$	I 型	钝边 1~1.5

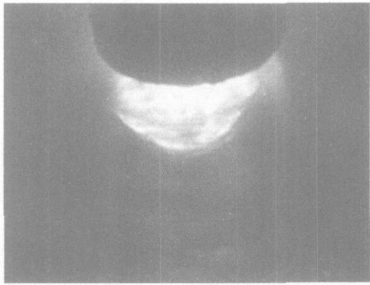


(a) 打底层焊速 70 cm/min

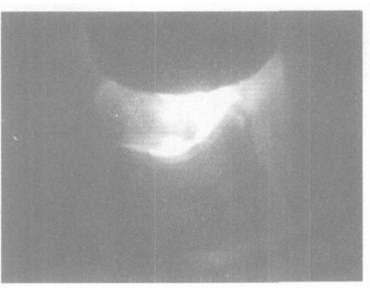


(b) 中间层焊速 50 cm/min

图 4 35 mm 铝合金双丝焊熔池视觉图像



(a)  $I=215 \sim 250 A$



(b)  $I=230 \sim 270 A$

图 5 6061 和 5083 铝合金对接焊图像

Fig 4 Molten pool images of 35 mm aluminum alloy double wire welding

Fig 5 Images of butt welding of 6061 and 5083 aluminum alloys

通过图 4 和图 5 还可以发现, 熔池中并没有明显的浮渣区, 表明若焊前进行仔细的清理, 焊接工艺恰当, 铝合金熔化极双丝焊熔池过程基本不产生浮渣, 这是和碳钢(合金钢)熔池图像的明显差别之一。

3 铝合金双丝 MIG 焊熔池图像处理

图 6 显示了提取熔池图像边界的图像处理全过程, 图 6a 是原始采集到的图像, 其余是图像处理和边缘提取照片。

当 CCD 摄像机与焊枪一起移动时, 由于焊接过程中的各种干扰, 导致熔池图像中存在一些低频干扰信号, 通过图像增强方法可以有效地消除, 对图 6a 做高斯模板图像平滑处理和中值滤波处理后得到图像如图 6b 所示。

经过增强后的熔池图像可以进行自动阈值分割, 使熔池图像二值化, 这里对自动阈值分割算法作一些说明。这种阈值分割不是通过给定阈值的图像分割, 而是一种自搜寻最佳阈值分割算法。一般的阈值分割采用对话框方式输入阈值(用灰度值表示), 若图像中所有像素点的值高于此阈值, 则将该点的像素值置为 255; 若低于该阈值, 则将其值置为 0。采用这种一般的阈值分割在对一幅图像进行处理时可以实现熔池区域的二值化, 但当在不同工艺参数下焊接时, 熔池图像灰度分布也不一样。因此一般的阈值分割不能提取多幅不同图像的边界。

最佳阈值的求取是通过迭代实现的, 具体的算

法可描述为

(1) 求出图像中的最小和最大灰度值  $Z_l$  和  $Z_h$ , 令阈值初值

$$T^0 = \frac{Z_l + Z_h}{2} \tag{2}$$

(2) 根据阈值  $T^k$  将图像分割成目标和背景两部分, 求出两部分的平均灰度值  $Z_o$  和  $Z_b$ ,

$$Z_o = \frac{\sum_{Z(i,j) < T^k} Z(i,j) \times N(i,j)}{\sum_{Z(i,j) < T^k} N(i,j)}, \tag{3}$$

$$Z_b = \frac{\sum_{Z(i,j) > T^k} Z(i,j) \times N(i,j)}{\sum_{Z(i,j) > T^k} N(i,j)} \tag{4}$$

式中:  $Z(i,j)$  是图像中  $(i,j)$  点的灰度值;  $N(i,j)$  是  $i,j$  点的权重系数, 这里取  $N(i,j) = 1.0$ 。

(3) 求出新的阈值

$$T^k = \frac{Z_o + Z_b}{2}, \tag{5}$$

(4) 如果  $T^k$  等于  $T^{k+1}$ , 则结束, 否则  $k = k + 1$ , 转第 2 步继续执行。

求出最佳阈值后, 再按一般的阈值分割操作, 经过最佳阈值分割处理后的熔池区图像如图 6c 所示。

图 6d 是对图 6c 运行边界提取算法后获得的熔池图像, 可见该图像反映了原图的轮廓边界, 上述熔池边界提取算法比较实用。

对该熔池轮廓进行几何参数提取, 得到熔池最大宽度为 284 像素, 最大半长为 171 像素, 熔池后拖脚为 101.32 度, 熔池面积为 41 696 像素。

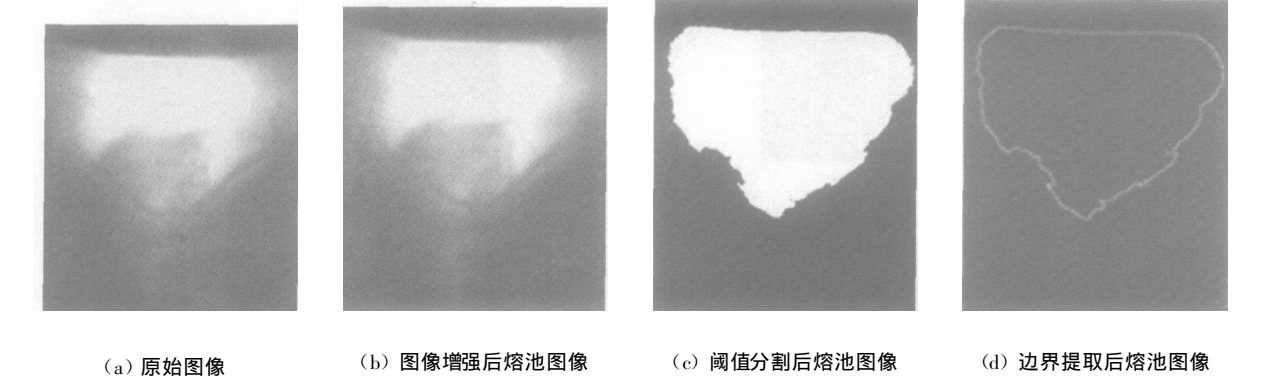


图 6 图像边界提取过程  
Fig. 6 Process of image boundary abstraction

4 结 论

(1) 基于铝合金焊的特点, 采用近红外窄带滤波传感建立了视觉传感系统, 采用 980 nm 窄带滤波

和合适的减光系统获得了较为清晰的铝合金双丝熔池视觉图像, 在此基础上采集熔池图像。

(2) 针对双丝铝合金熔池图像的特点, 采用数字图像处理技术处理熔池图像, 并提取了熔池边界, 获取熔池几何参数。 [ 下转第 60 页 ]

tive scheme[ J] . JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 2004, 47(4): 1161—1165.

[ 2] Renzo D, Alberto D M. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes[ J] . Chemical Engineering Science, 2004, 59(3): 525—541.

[ 3] 周 鲲, 邵 华. 焊接机器人的示教轨迹优化[ J] . 机械设计与制造, 2003(4): 46—47.

[ 4] 吴 威, 赵 杰, 王晓东, 等. 焊接机器人在线示教[ J] . 焊接学报, 1995, 16(1): 16—19.

[ 5] 张爱红, 张秋菊. 基于虚拟现实技术的机器人示教方法[ J] . 江南大学学报, 2003, 2(3): 258—261.

[ 6] 张惠斌, 周振丰, 吴 林, 等. 遥控弧焊机器人系统[ J] . 焊接学报, 1995, 16(3): 153—157.

[ 7] 吴 威, 刘丹军, 尤 波, 等. 触觉式机器人焊缝跟踪方法[ J] . 焊接学报, 1995, 16(3): 158—161.

[ 8] 吴 威, 蔡鹤皋, 吴 娟. 主从式焊接机器人力觉临场感技术[ J] . 焊接学报, 1996 17(2): 122—127.

---

**作者简介:** 刘立君 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 硕士生导师。研究方向为焊接过程智能控制, 发表论文 40 余篇。

**Email:** 888liulijun@163.com

[ 上接第 56 页]

参考文献:

[ 1] 李俊岳, 宋永伦, 李 恒, 等. 焊接电弧光谱信息的基本理论和基本方法[ J] . 焊接学报, 2002, 23(6): 5—8

[ 2] 王克鸿, 汤新臣, 刘 永, 等. 射流过渡熔池视觉检测与轮廓提取[ J] . 焊接学报, 2004, 25(2): 66—68, 72

[ 3] Wang Kehong, Tang Xincheng, Liu Yong. Method of visional detecting MAG weld pool information[ J] . Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 10(15): 369—374.

[ 4] Balfour C, Smith J S. Feature correlation for weld image-processing applications[ J] . International Journal of Production Research, 2003, 42(5): 975—995

[ 5] Wang Jianjun, Yang Xueqin, Lin Tao. Patter recognition of topside pool image in aluminium alloy TIG welding[ J] . Transactionsof the China Welding Institution, 2002, 23(5): 73—76.

---

**作者简介:** 王克鸿 男, 1963 年出生, 博士, 教授。主要从事焊接过程自动控制、弧焊机器人智能化应用技术和机电一体化设备等方面的研究工作, 发表论文 50 余篇。

**Email:** wkh1602@126.com

DENG Cai-Yan (School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p37—40

**Abstract:** This research measures the residual stress of high frequency electric resistant welded pipe using the central-hole method and analyses the transient state of deformation and residual stress of the weld with ANSYS nonlinear finite element program. The experimental results show conformity compared with the FEA results. And the distributing of residual stress of high frequency resistant welded pipe compared with the that of normal arc welding, but the numerical values are smaller. This result is important to weld project.

**Key words:** high frequency electric resistance welded pipe; residual stress; ANSYS

#### Current waveform control system of high-speed CO<sub>2</sub> arc welding

CHEN Huan-ming<sup>1</sup>, ZENG Min<sup>2</sup>, CAO Biao<sup>2</sup> (1. Department of Welding Engineering, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330063, China; 2. College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China). p41—45

**Abstract:** A new control method of welding current waveform was investigated to solve the problem of bad weld appearance and much spatter in high-speed CO<sub>2</sub> arc welding, which controlled the short circuit current and its rising rate in short circuit period, and adopted the two-step constant current method of big constant current and small constant current to adjust the arc energy in arc period. According to the control principle, the system based on a single chip computer and the software of the waveform control were developed. The effect of waveform control parameters on weld appearance was analyzed, and the parameters were optimized. The results show that this system can precisely control the arc energy with the two-step constant current method, and obviously improves the performance of welding process, and meets the needs of high-speed CO<sub>2</sub> arc welding.

**Key words:** current waveform control; high-speed welding; CO<sub>2</sub> arc welding; single chip computer

#### Effect of unbalance factor on toughness of weld metal by CO<sub>2</sub> arc welding with flux cored wire

GUI Chi-bin<sup>1</sup>, ZHOU Hong-bin<sup>1</sup>, YU Chao-fei<sup>2</sup>, DU Xiao-qi<sup>2</sup> (1. Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Wuhan Anchor Welding Material Limited Liability Company, Wuhan 430084, China). p46—48

**Abstract:** The effects of unbalance factor  $B$  controlled by nitride forming elements Al, Ti etc on the impact toughness of weld metal by CO<sub>2</sub> arc welding with flux cored wire were studied. The experimental results showed that as the  $B$  increases, the impact toughness increases at first and then decreases. Because of the fluxes oxidability, the optimal value of  $B$  raised as compared by CO<sub>2</sub> arc welding with solid wire. As the increases from the first to optimal value, the main microstructure of the weld metal changed from gran-

ular bainite and ferrite side-plate to acicular ferrite, so the impact toughness was improved. But in case of the  $B$  over the optimal value very much, the toughness decreased because the surplus nitride forming elements resided in the parent of ferrite.

**Key words:** flux cored wire; CO<sub>2</sub> arc welding; toughness; unbalance factor

#### Effects of N<sub>2</sub> protection on wettability of Sn-Cu-Ni-Ce lead-free solder

WANG Jian-xin<sup>1</sup>, XUE Song-bai<sup>1</sup>, HUANG Xiang<sup>1</sup>, HAN Zong-jie<sup>1</sup>, YU Sheng-lin<sup>1,2</sup> (1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The 14th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210013, China). p49—52

**Abstract:** The wettability of Sn-Cu-Ni-Ce solder on Cu substrate was investigated by wetting balance testing method under the conditions of different temperatures and atmospheres, and the effects of atmosphere, temperature and small amount of rare-earth element Ce added to the solder on the wettability of Sn-Cu-Ni solder were also studied respectively. The results indicate that wetting time of the lead-free solder is reduced by 20%—50%, and the wetting force is also increased in N<sub>2</sub> atmosphere because of the surface tension increase of the Cu substrate and the surface tension decrease of the Sn-Cu-Ni-Ce solder. With temperature increasing, the surface tension of the Sn-Cu-Ni-Ce solder decreases, so wetting time is observably reduced. rare-earth element Ce could lead to decrease evidently the surface tension of the Sn-Cu-Ni solder as well as the interfacial tension between solder and Cu substrate, so the wettability of Sn-Cu-Ni-Ce solder is better than that of Sn-Cu-Ni solder.

**Key words:** Sn-Cu-Ni-Ce solder; lead-free solder; wettability; Ce

#### Molten pool image gathering and processing of aluminum alloy twin-wire MIG welding

WANG Ke-hong, JIA Yang, QIAN Feng, SHEN Ying-ji (Department of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China). p53—56, 60

**Abstract:** A passive vision sensing system for the image of twin-wire MIG welding molten pool of aluminum alloy has been set up. Near-infrared CCD and compound filters system are used to eliminate the arc disturbance, and the best filter window of aluminum alloy is obtained, from which good images can be acquired. By using image enhancement, threshold partition, boundary extraction, the molten pool boundary and the molten pool geometric parameters are extracted through image processing.

**Key words:** twin-wire metal inert-gas welding; molten pool; near infrared vision sensing; image processing

#### Transition control between two tele-teaching points based on force sensing in remote welding

LIU Li-jun<sup>1,2</sup>, GAO Hong-