

铝合金薄板高斯脉冲 MIG 焊

朱 强<sup>1</sup>, 薛家祥<sup>2</sup>, 徐 敏<sup>2</sup>

(1. 广东交通职业技术学院 电子与通信工程学院, 广州 510800; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

**摘 要:** 提出了 GAUSS-MIG 焊模型, 成功在 2 mm 和 3 mm 厚度的铝合金薄板进行了焊接试验. 通过分析试验采集的信号, 发现焊接电流电压波形规整、分布有规律, 重复性好, 能量输入集中, 弧长稳定, 证明了 GAUSS-MIG 焊的焊接过程平稳. GAUSS-MIG 焊焊缝的力学性能比传统的铝合金双脉冲焊有一定的提高, 并且焊缝外观鱼鳞纹清晰工整, 表面光亮, 熔高和熔深合适, 焊接过程几乎无飞溅发生, 电弧声柔和, 焊接质量好.

**关键词:** 铝合金; 高斯函数; 脉冲熔化极惰性气体保护焊; 电流波形控制

**中图分类号:** TG 444      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-360X(2016)08-0071-04

0 序 言

在节能减排的大趋势下, 铝合金作为轻质合金材料的一种, 在汽车制造, 高铁车厢和船舶工业等领域里获得越来越广泛的应用. 但是铝合金材料的热导率大, 焊接过程中热量损失快, 材质较软, 易堵丝, 热强性低, 容易塌陷焊穿, 特别是薄板铝合金的焊接更是困难<sup>[1]</sup>. 难以焊接问题是制约铝合金材料广泛使用的一大障碍, 脉冲熔化极气体保护焊 (pulsed gas metal arc welding, GMAW-P) 方法出现后, 铝合金的焊接质量有了很大改进, Subramaniam 等人<sup>[2]</sup>详细研究了型号为 4047 的铝合金焊丝从大滴过渡到喷射过渡的条件, 对于指导铝合金焊接参数的选取有重要意义. 为了减少铝合金焊缝的气孔, 细化焊缝晶粒, 得到规整的鱼鳞纹焊缝, 许多研究人员从熔滴过渡形式, 保护气体成分, 各种焊接参数匹配, 电流电压波形控制等方面对双脉冲焊铝进行了细致的研究, 取得了一些效果<sup>[3-8]</sup>. 双脉冲铝合金焊接过程对工艺参数匹配区间要求严格, 在区间以外的焊接质量下降很快, 对于薄板的焊接更是如此. 作者根据铝合金焊接的特点提出了高斯电流波形调制脉冲熔化极惰性气体保护焊方法 (pulsed metal inert gas welding method of GAUSS waveform modulation, GAUSS-MIG), 该方法能利用高斯函数曲线的特点, 焊接过程中能集中热量输入, 并且脉冲波形变化平滑, 可控性好, 在 2 mm 的铝合金薄板焊接试验中,

焊接过程稳定, 电弧声柔和, 飞溅极少, 焊缝成形良好, 工件无焊穿塌陷现象. 试验证明, GAUSS-MIG 焊是一种良好的铝合金焊接方法, 为铝合金的焊接提出了新的理论研究模型.

1 GAUSS-MIG 焊模型

双脉冲 MIG 焊接过程是采用一个低频信号对高频脉冲电流进行调制, 在电流波形图上就表现为一组强脉冲群和一组弱脉冲群交替出现. 交替出现的强弱脉冲群导致焊接工件的热量输入也是强弱交替出现, 因此在国外也被称为冷热脉冲群焊接. 这种焊接方法不仅具有单脉冲焊接中平均焊接输入电流低的特点, 交替出现的强弱脉冲群还能搅拌熔池释放熔池里的气泡, 产生美观的鱼鳞纹焊缝, 这对于焊缝中容易形成气泡的铝合金焊接有重要的改进意义. 新型的 GAUSS-MIG 焊接模型在双脉冲焊接的基础之上更进一步, 采用平滑的, 具有无限阶可导的高斯函数曲线调制焊接电流的方波脉冲群, 不仅产生热冷交替的强弱脉冲群, 而且使得强弱脉冲群之间有了平滑的过渡. 同时, 高斯曲线能量集中, 可控性好, 能增加强脉冲群热输入的集中性, 也具有搅动熔池释放气泡和控制平均电流大小的效果, 适合对热量输入控制要求较高的薄板铝合金的焊接.

高斯函数的一般公式为

$$f(x) = ae^{-(x-b)^2/c^2} \tag{1}$$

式中:  $b$  为函数曲线对称轴的位置;  $a$  为曲线幅值的控制参数;  $c$  为控制曲线宽度的参数. GAUSS-MIG 模型焊接脉冲电流波形示意如图 1 所示, 为了简化高斯函数, 方便进行工艺试验, 在模型中  $b$  值取零,  $c$

收稿日期: 2015-03-04  
基金项目: 广东省科技计划资助项目 (2013B090600098); 广州市黄埔区科技计划资助项目 (201341); 佛山市科技计划资助项目 (2011AA100175)

值取 1。脉冲电流经高斯函数调制后,从宏观上看电流波形变化曲线呈现高斯波形变化,一个高斯强脉冲群连着一个弱脉冲群,形成一种新型的双脉冲波形。

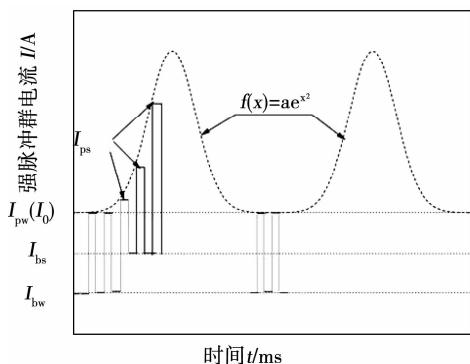


图 1 GAUSS-MIG 模型

Fig. 1 GAUSS-MIG model

从图 1 中看出,强脉冲群电流的峰值大小随时间变化而变化,变化规律是按照高斯函数曲线变化,符合下式关系,即

$$I_{ps} = I_0 + ae^{-x^2} \quad (2)$$

图 1 中的  $I_{ps}$  表示高斯脉冲峰值电流,大小等于峰值初始电流  $I_0$  加上高斯值  $ae^{-x^2}$ ,  $I_{bs}$  表示高斯强脉冲群基值电流,  $I_{pw}$  表示弱脉冲群峰值电流,  $I_{bw}$  表示弱脉冲群基值电流。试验设计时,为了验证模型的普适性,图中的  $I_{bw}$  和  $I_{bs}$  的取值可以相等,  $I_{pw}$  和  $I_0$  的取值可以相等。

## 2 分析试验

### 2.1 试验平台

焊接试验数据采集平台包括负载变阻箱,研华 610 工控机、研华 PCL1800 信号采集卡、华威自动行走控制机构、用于采集电流电压实时信号的电弧动态小波分析仪、基于 DSP 的脉冲 MIG 焊软开关逆变电源和送丝机等设备。试验条件为:1.2 mm 的铝硅合金焊丝,型号为 ER4043,在 2 mm 的纯铝薄板上进行平板堆焊,保护气体为 99.99% 氩气,气体流量为 18 L/min,焊丝伸出长度为 15 mm,行走机构速度恒定,等速送丝。

电弧动态小波分析仪是采集焊接过程中的信号并进行分析的重要工具,其上位机软件安装在工控机上用来采集焊接过程中实时的电流电压信号,信号经过分析整理后可用来判定焊接过程的稳定性。

为了验证 GAUSS-MIG 焊在铝合金薄板焊接上的效果,设计了焊接试验工艺参数如下:高斯函数的

系数  $a$  取值为 50 A,高斯强脉冲群和弱脉冲群峰值时间均为 1.5 ms;强脉冲群基值时间为 15 ms,弱脉冲群基值时间为 25 ms;弱脉冲群的峰值电流  $I_{pw}$  和强脉冲群电流  $I_0$  的取值为 300 A;强脉冲基值电流  $I_{bs}$  和弱脉冲基值电流  $I_{bw}$  的取值都是 50 A;低频频率为 1.7 Hz。

### 2.2 试验分析

焊接过程采集的实时电流电压信号如图 2a ~ 图 2d 所示。

图 2a 和图 2b 是电流波形图,焊接整个过程中的电流波形重复性好,没有瞬时的毛刺出现,统计的平均电流为 64 A,强脉冲群基值电流是 50 A,强脉冲群峰值电流按照高斯波形变化,最小值是 300 A,最大值是 350 A,弱脉冲群峰值电流是 300 A,基值电流是 50 A。

焊接过程中弧长的稳定性直接体现了电压的稳定性,图 2c 是焊接电压波形图,统计的平均电压是 20.7 V,最小电压是 15.9 V,最大电压是 36.4 V,整个波形呈现有规律的高斯波形变化,电压波动范围较小,说明焊接过程稳定,图 2d 是放大的电压波形,从图中可以看出电流峰值阶段对应的电压也变大形成一个峰值,对应着熔滴过渡后弧长的突然变长,而在电流基值维弧阶段,电压较低并且稳定,波动小。

图 3 是焊接实时信号分析图。其中图 3a 是  $U-I$  图,横坐标代表的是焊接过程的电流值,纵坐标是电流对应的电压值,它可以看做是由图 2a 和图 2c 组合而成,从图上可直观地对焊接动态过程进行分析评定。电流和电压画出的图像边缘线族清晰、整齐,分布集中,重复性高,说明焊接过程中电流与电压在一个相对集中的范围内变化,没有大的跳变,整个焊接过程的稳定性好。

图 3b 表示的焊接输入能量是指电弧瞬时电流和瞬时电压的乘积,它的大小决定了电弧的长短和熔滴的过渡形式,从图中可以看出,脉冲能量呈现规则的高斯波形变化,说明焊接过程的熔滴过渡有规律,通过高斯参数  $a$  的调节容易控制焊接输入的瞬时能量。图 3c 是焊接过程的动态电阻,其值是瞬时电压和电流的商,随着高斯波形以  $0.45 \Omega$  为中心在  $0.1 \sim 0.7 \Omega$  范围内变动,具有较好的集中性和规律性。从焊接试验过程中来看,整个焊接过程顺利完成,中间无断弧和短路现象发生,电弧声不刺耳,为柔和的“滋滋”声,飞溅很少。

焊缝成形外观如图 4 所示,从焊件母材正面外观上看,焊缝成形好,熔高和熔深合适,表面光亮,鱼鳞波纹清晰有规律;从焊件母材反面看,无焊穿和塌陷现象。

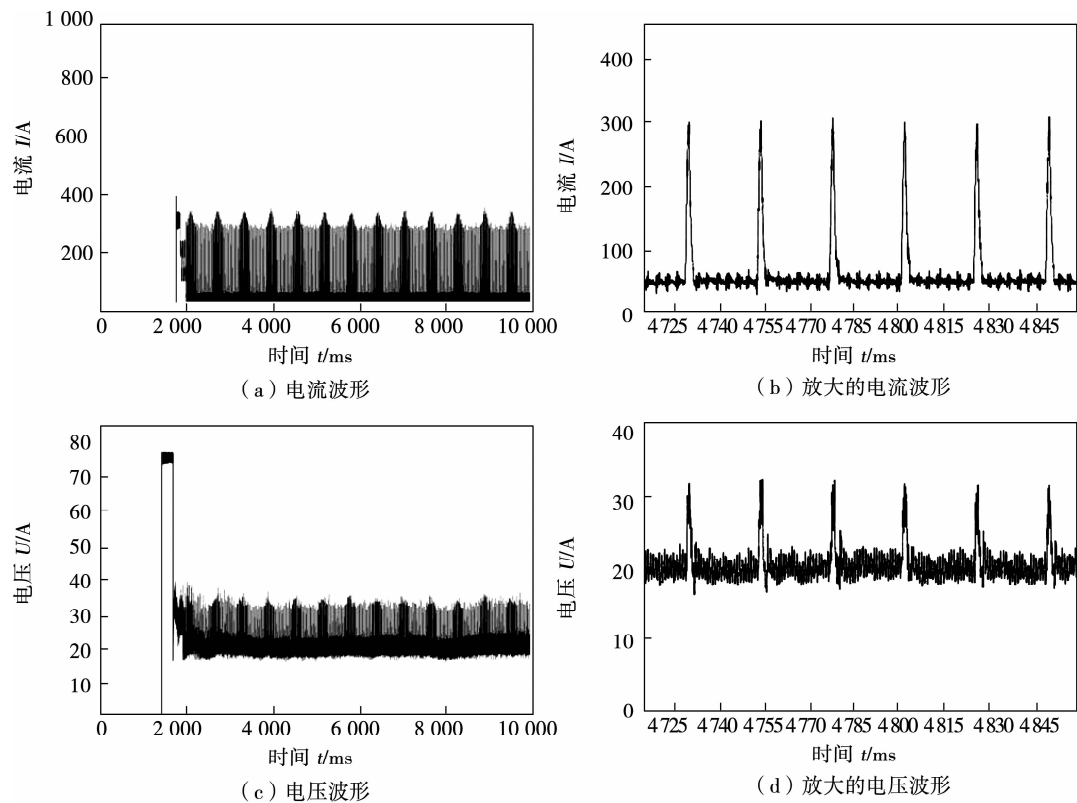


图 2 焊接过程电流电压实时信号  
Fig. 2 Real-time welding signals

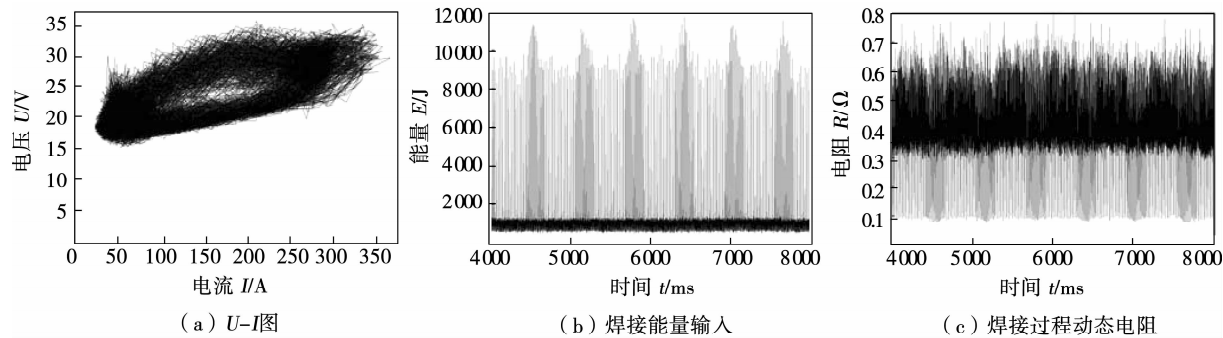


图 3 焊接实时信号分析  
Fig. 3 Real-time welding signals analysis

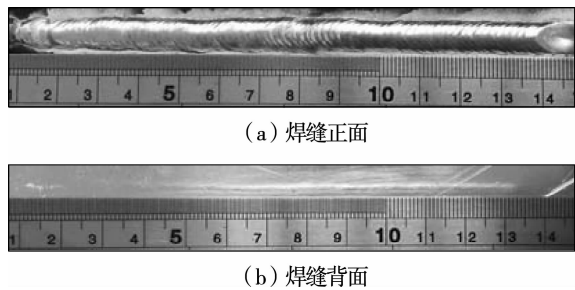


图 4 焊缝外观形貌  
Fig. 4 Weld seam photo

2.3 双脉冲与 GAUSS-MIG 焊对比

为了进一步验证 GAUSS-MIG 焊的效果,在同一

个试验平台上,作者设计了两组试验,采用 3 mm 厚纯铝薄板进行试焊,对双脉冲与 GAUSS-MIG 焊的焊缝效果进行对比. 高斯函数的系数  $a$  取值为 50 A, 两组试验小车行走速度恒定,等速送丝,保护气体为 99.99% 氩气,气体流量为 15 L/min,焊丝伸出长度为 15 mm,采用恒流焊,试验采用的电流参数如表 1 所示.

从试验采集的电流电压波形看,GAUSS-MIG 焊的焊接过程比双脉冲焊的稳定,焊缝外观的规整性也更好.

对两种焊接方法焊后的试件表面磨平抛光,采用线切割方法准备拉伸试样,试样厚度为 3 mm,外

表 1 双脉冲与 GAUSS-MIG 焊对比试验参数

Table 1 Comparative experiment parameters of double pulse and GAUSS-MIG welding

|                 | 强脉冲群                              |                                   |                                  |                                   | 弱脉冲群                             |                                   |                                  |                                   | 低频频率<br>$f/\text{Hz}$ | 平均电流<br>$I/\text{A}$ |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|
|                 | 峰值电<br>流 $I_{\text{ps}}/\text{A}$ | 峰值时间<br>$t_{\text{ps}}/\text{ms}$ | 基值电流<br>$I_{\text{bs}}/\text{A}$ | 基值时间<br>$t_{\text{bs}}/\text{ms}$ | 峰值电流<br>$I_{\text{pw}}/\text{A}$ | 峰值时间<br>$t_{\text{pw}}/\text{ms}$ | 基值电流<br>$I_{\text{bw}}/\text{A}$ | 基值时间<br>$t_{\text{bw}}/\text{ms}$ |                       |                      |
| NO.1(双脉冲)       | 220                               | 2                                 | 50                               | 4                                 | 180                              | 2                                 | 50                               | 6                                 | 2.8                   | 95.4                 |
| NO.2(GAUSS-MIG) | 变化                                | 2                                 | 50                               | 4                                 | 190                              | 2                                 | 50                               | 6                                 |                       | 96.4                 |

形尺寸如图 5 所示.

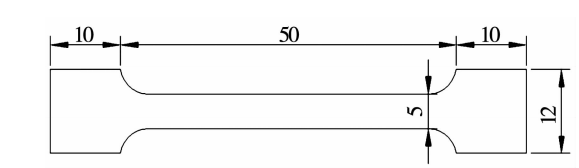


图 5 拉伸试件尺寸 (mm)

Fig. 5 Size of tensile specimen

表 2 的数据是采用岛津 HMV-2T 型显微硬度计测试焊缝硬度,通过试件表面各取 10 个点,取平均值;采用岛津 AG-IC 立式电子万能试验机拉伸试样测试力学性能,每组焊缝各测五个试样,对获得的数据求平均值. 双脉冲和 GAUSS-MIG 焊两种焊接方法的焊缝屈服强度、抗拉强度和显微硬度数值都比母材大,并且 GAUSS-MIG 焊的焊缝维氏硬度比双脉冲的提高了 17.89%,抗拉强度提高了 13.97%,屈服强度提高了 28.95%,各项力学性能指标的提高说明和传统的铝合金双脉冲焊接方法相对比,GAUSS-MIG 焊是一种新型优良的铝合金薄板焊接新方法.

表 2 双脉冲与 GAUSS-MIG 焊缝力学性能对比

Table 2 Mechanical properties comparison of double pulse and GAUSS-MIG weld

| 类型      | 屈服强度<br>$R_{\text{eL}}/\text{MPa}$ | 抗拉强度<br>$R_{\text{m}}/\text{MPa}$ | 显微硬度<br>(HV) |
|---------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| 母材      | 73.14                              | 81.15                             | 43.92        |
| No.1 焊缝 | 78.06                              | 92.18                             | 67.23        |
| No.2 焊缝 | 100.66                             | 105.06                            | 79.26        |

### 3 结 论

(1) 高斯函数曲线平滑,无限阶可导,用来调制焊接过程中的脉冲电流波形,可以形成强弱脉冲群交替出现的效果,是一种新型的铝合金双脉冲焊接模型.

(2) 在 2 mm 和 3 mm 铝合金薄板的焊接试验中,GAUSS-MIG 模型焊接过程平稳,飞溅少,焊缝成形美观,表面的鱼鳞纹规整光亮,电弧声柔和.

(3) GAUSS-MIG 焊焊缝力学性能比传统的铝合金双脉冲焊缝有一定的提高,是一种良好的铝合金薄板焊接新方法.

(4) 相对于传统的双脉冲焊接方法,GAUSS-MIG 模型的热输入集中,调整参数少,为铝合金焊接的一元化调节提供了新的解决方案.

### 参考文献:

[1] 殷树言. 气体保护焊工艺基础及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[2] Subramaniam S, White D R, Jones J E, *et al.* Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum[J]. *Welding Journal*, 1998, 77(11): 458–464.

[3] Da SCLM, Scotti A. The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 171(3): 366–372.

[4] 姚 屏, 薛家祥, 蒙万俊, 等. 工艺参数对铝合金双脉冲 MIG 焊焊缝成形的影响[J]. *焊接学报*, 2009, 30(3): 69–72.

Yao Ping, Xue Jiaxiang, Meng Wanjun, *et al.* Influence of processing parameters on weld forming in double pulse MIG welding of aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(3): 69–72.

[5] Ferraresi V A, Figueiredo K M, Ong T H. Metal transfer in the aluminum gas metal arc welding[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2003, 25(3): 229–234.

[6] Ghosh P K, Dorn L, Kulkarni S, *et al.* Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(3): 1262–1274.

[7] 魏仲华, 龙 鹏, 陈小峰, 等. MIG 焊铝正弦波调制脉冲控制参数应用[J]. *焊接学报*, 2012, 33(4): 9–12.

Wei Zhonghua, Long Peng, Chen Xiaofeng, *et al.* Application of control parameter in sinusoid modulation pulsed MIG welding of aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(4): 9–12.

参考文献:

[1] 刘会杰, 李金全, 段卫军. 静止轴肩搅拌摩擦焊的研究进展 [J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 108 – 112.  
Liu Huijie, Li Jinquan, Duan Weijun. Progress in the stationary shoulder friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 108 – 112.

[2] 王希靖, 申志康, 张忠科. 铝和镀锌钢板的搅拌摩擦焊搭接分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 97 – 100.  
Wang Xijing, Shen Zhikang, Zhang Zhongke. Study of friction-stir-welded lap joint of aluminum and zinc-coated steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 97 – 100.

[3] 申志康, 杨新岐, 张照华, 等. 铝合金回填料式搅拌摩擦点焊组织及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2013, 32(6): 73 – 76.  
Shen Zhikang, Yang Xinqi, Zhang Zhaohua, *et al.* Analysis of microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 32(6): 73 – 76.

[4] Shen Z, Chen Y, Hou J S C, *et al.* Influence of processing parameters on microstructure and mechanical performance of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(1): 48 – 57.

[5] Shen Z, Yang X, Yang S, *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction spot welded 6061-T4 aluminum alloy [J]. Materials and Design, 2014, 54(3): 766 – 778.

[6] Zhao Y, Liu H, Lin Z, *et al.* Microstructures and mechanical properties of friction spot welded Alclad 7B04-T74 aluminium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(7): 617 – 622.

[7] Rosendo T, Parra B, Tier M, *et al.* Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy [J]. Materials and Design, 2011, 32(3): 1094 – 1100.

[8] Oosterkamp A, Oosterkamp L, Nordeide A. Kissing bond phenomena in solid-state welds of aluminum alloys [J]. Welding Journal, 2004, 83(8): 225 – S.

[9] Gerlich, A, Avramovic-Cingara, G, North, T. Stir zone microstructure and strain rate during Al 7075-T6 friction stir spot welding[J]. Metalurgical and Materials Transaction A, 2006, 37(9): 2273 – 2886.

[10] Tylecote R F. The solid phase welding of metals[M]. New York: St. Martin’s Press. 1968.

**作者简介:** 郑 敏,女,1990 年出生,硕士研究生. 主要从事搅拌摩擦点焊方面的研究工作. Email: zhengmin0991@qq.com

**通讯作者:** 杨新岐,男,教授,Email:xqyang@tju.edu.cn

[上接第 74 页]

[8] 路 浩, 邢立伟, 梁志明. 铝合金活性 MIG 焊接电弧行为及微观组织分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 1 – 4.  
Lu Hao, Xing Liwei, Liang Zhimin, *et al.* Arc behavior of A-MIG welding and microstructure of aluminum alloy welded joint[J].

Transactions of The China Welding Institution, 2014, 35(11): 1 – 4.

**作者简介:** 朱 强,男,1977 年出生,讲师,硕士. 主要从事弧焊电源的智能控制和计算机应用研究. 发表论文 10 多篇. Email:zhus-cut@163.com