

铝合金变极性 TIG 焊接电弧行为

韩永全, 张世全, 庞世刚, 洪海涛

(内蒙古工业大学 内蒙古材料成型及控制重点实验室, 呼和浩特 010051)

摘 要: 分别采用正弦波变极性和方波变极性氩弧焊对铝合金试板进行了焊接试验, 利用高速摄像机和汉诺威分析仪分别对焊接过程中变极性电弧形态及电信号进行采集分析。结果表明, 电弧电压概率密度分布和高速摄像图证实了较小焊接参数条件下正弦波变极性比方波变极性电弧稳定性差的现象。正弦波变极性 TIG 电弧随 EP(反极性)的增加清理宽度增加, 但熔宽未增加, 证明此条件下正弦波变极性 TIG 电弧过于发散; 焊接参数较大时, 随 EP 的增加, 正弦波变极性熔宽变宽, 证实正弦波变极性 TIG 电弧稳定性随之提高, 证明了铝合金变极性 TIG 焊接过程中 EP 极性电弧产热大于 EN 极性电弧能量的本质特征。

关键词: 变极性 TIG 焊; 电弧形态; 焊缝成形

中图分类号: TG 456.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)09-0051-04

0 序 言

铝及铝合金具有密度小、比强度高、良好的耐蚀性、导电导热性以及低温下能保持良好的力学性能等特点, 广泛地应用于航空航天、交通运输、国防等领域^[1-4]。铝合金 TIG 焊由普通交流、方波交流, 发展到如今的变极性焊接, 且根据需要陆续出现各种类型的变极性焊接波形。因此对不同类型变极性波形所表现出的电弧形态、电弧稳定性和电弧产热等方面系统研究是非常必要的。正弦波变极性波形具有较正弦交流波形过零速度快, 电弧声较方波变极性波形柔和等优点^[5]。通过大量试验发现, 小规范焊接, 电弧形态及其产热机理和焊缝成形与大规范焊接存在一定的差别。目前对于该波形的电弧形态、稳定性及阴极清理效果和对焊缝熔深的影响规律研究甚少。研究不同变极性波形电弧形态、稳定性及电弧产热机理对于正确理解铝合金变极性 TIG 焊接机理的本质, 研究开发新型变极性 TIG 焊接工艺具有重要意义。

1 试验材料及设备

试验材料为 5 mm 厚 1060 铝合金, 采用美国米勒 Dynasty 700 型逆变变极性氩弧焊机, 该焊机输出范围大, 兼容大电流铜焊接和铝合金焊接的自动工

艺。同时用汉诺威质量分析仪及高速摄像机进行同步信息采集, 通过汉诺威质量分析仪实时采集焊接电参数并进行统计分析, 采用美国 IDT 公司型号为 Y4-S2 的高速摄像机对焊接电弧以 3 000 帧/s 的帧速进行拍摄。表 1 为 1060 铝合的化学成分^[6]。

表 1 1060 铝合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of 1060 aluminum alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	V	Ti	Al
0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	0.05	0.05	0.03	99.6

2 试验方法

变极性焊接波形的交流频率、正负极性电流幅值和时间比均可独立调节, 每个参数对焊接过程稳定性、焊缝成形质量和焊接效率有不同的影响^[7]。多参数的协调控制可以获得最佳的焊接质量和焊接效率。试验以正弦波变极性和方波变极性两种波形为主要研究对象, 通过分析两种变极性波形在不同焊接参数和正反极性时间比条件下电弧形态、电流电压波形及焊缝成形, 以此来研究不同极性时间比对焊缝成形的影响规律, 以及不同类型波形其电弧形态和对试板加热效应的区别。试验 EP 比(一个周期内反极性电流所占时间比例)分别设为 20%, 30%, 40%, 50%, 为了保证试验的准确性, 保持每个焊道外界条件的一致性, 包括钨极形状, 试板温度和弧高等, 其它焊接参数如表 2 所示。

表2 焊接参数
Table 2 Welding parameters

变极性频率 f/Hz	正极性电流 I_{EN}/A	反极性电流 I_{EP}/A	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	氩气流量 $q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
50	80	80	200	11

3 试验结果及分析

3.1 变极性 TIG 焊接电弧形态分析

图1,图2为截取的EP比为20%,正反极性电流均为80 A时一个周期内部分高速摄像图片。图1为正弦波变极性TIG电弧形态,图2为方波变极性TIG电弧形态。

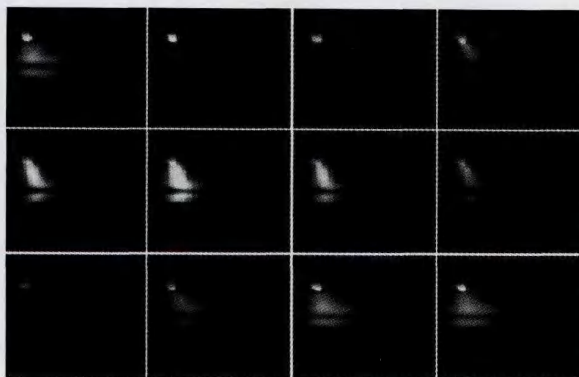


图1 正反极性电流均为80 A正弦波变极性电弧形态

Fig. 1 Sine wave variable polarity arc shape

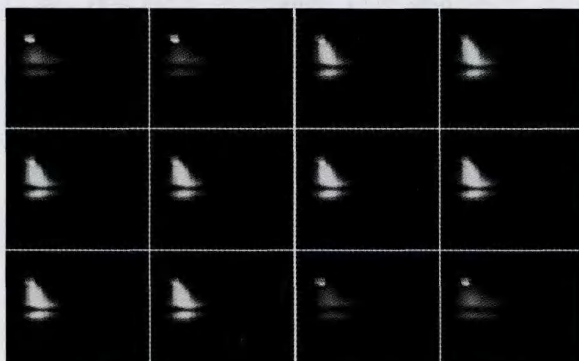


图2 正反极性电流均为80 A方波变极性电弧形态

Fig. 2 Square wave variable polarity arc shape

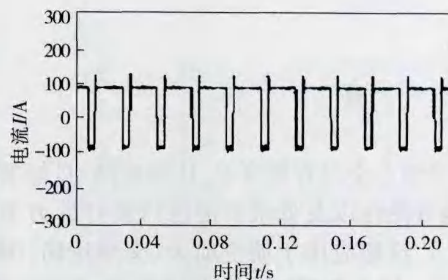
从图1可看出,电弧的形态随时间变化而发生改变,按从左到右的顺序,依次为反极性电弧—反极性到正极性的过渡—正极性电弧形态。从高速摄像可发现,反极性电弧较发散,从反极性变正极性需一定过渡时间。同样,由正极性变反极性时也需要一定时间。反极性(EP),工件为阴极,阴极斑点寻找氧化

膜而不断游动,使电弧分散,热量不集中,所以电弧较暗;在正极性(EN),钨极为阴极,由于钨极具有很强的发射电子能力,且钨极端部面积小,所以电弧直径较小,能量集中,电弧较亮^[8,9]。

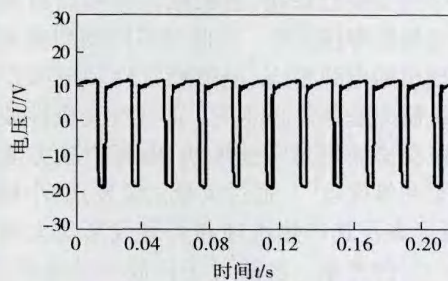
图2为方波变极性焊接电弧形态,对比正弦波变极性电弧形态发现,虽然反极性电弧仍然发散,但亮度大于正弦电弧,说明发散程度较正弦电弧小,而且过渡时间极短。这一现象对试板的熔宽及试板的氧化膜清理作用都有不同的效果。

3.2 焊接电流和电弧电压波形分析

图3为EP比20%,正反极性电流均为80 A时方波变极性电流电压波形,可以看出,电流不论由EN(钨极为负)向EP(钨极为正)转变,还是由EP向EN转变,都会出现一个瞬时尖峰值,而后达到稳定值。



(a) 电流波形



(b) 电压波形

图3 方波变极性电流电压波形

Fig. 3 Current and voltage waveforms of variable polarity square wave

图4为EP比20%,正反极性电流均为80 A正弦波变极性电流电压波形,与图3对比可以看出,在正弦波变极性电弧引燃初期焊接电流及电弧电压波形出现异常现象。图5为该时间段所对应的部分电弧形态,从图5中可看出,在电弧引燃初期,不仅存在熄弧,而且其电弧形态也非正常状态。从图7也可以看出,电压概率密度值出现幅值超出100 V的电压信号。这些现象说明了小规范条件下正弦波变极性电弧的不稳定性。

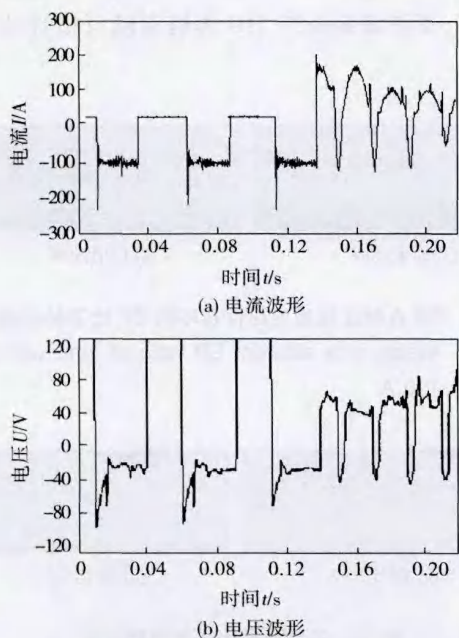


图4 正弦波变极性电流电压波形

Fig. 4 Current and voltage waveforms of variable polarity sine wave

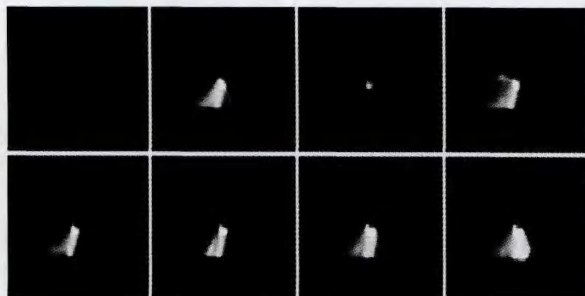


图5 不稳定电弧形态

Fig. 5 Unstable arc shape

图6和图7分别为图3和图4电压波形的概率密度分布图.图6只出现两个峰值,说明方波变极

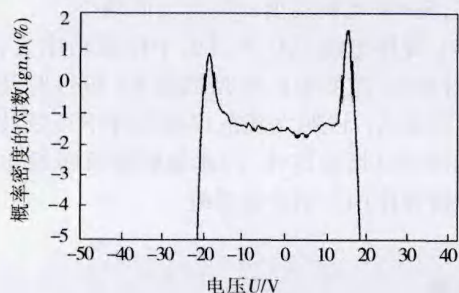


图6 方波变极性弧压概率密度分布

Fig. 6 Probability density distribution of arc pressure of variable polarity square wave

性电弧非常稳定,而图7中出现多个峰值,说明此时正弦波变极性电弧极不稳定.

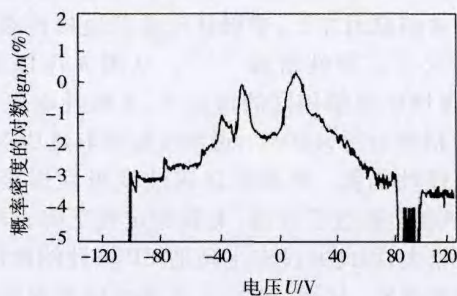


图7 正弦波变极性弧压概率密度分布

Fig. 7 Probability density distribution of arc pressure of variable polarity sine wave

3.3 变极性电弧极性比对焊缝成型的影响

变极性电弧对焊缝成型的影响,主要取决于不同极性电弧产热机理的不同.图8为正弦波变极性电弧焊缝成型,而图9为方波变极性电弧焊缝, (图9a~图9d EP比为20%~50%),正、反极性电流均为80 A.从焊缝成型图中发现,在小规范(80 A)焊接条件下正弦电弧随EP比增大,工件的清理宽度逐渐增大,但熔宽逐渐变窄.然而从图9发现

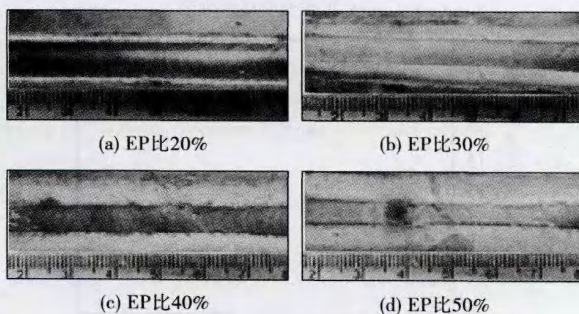


图8 正弦波变极性在不同EP比下的焊缝成型

Fig. 8 Welds with different EP of sine wave

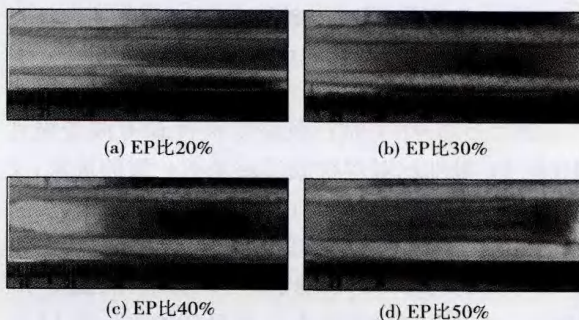


图9 方波变极性在不同EP比下的焊缝成型

Fig. 9 Welds with different EP of square wave

方波变极性电弧随 EP 比增大清理宽度和熔宽同时增大。

方波变极性电弧随 EP 比增大清理宽度和熔宽同时增大的原因在于,变极性电弧的反极性期间电弧能量大于正极性所致^[10-12]。从图 3 可以发现,正、反极性电流值相同的情况下,正极性电压为 12 V,而反极性电压为 19 V。说明反极性电弧功率明显大于正极性电弧。但是在正弦波变极性焊接条件下,反极性电弧过于发散,电弧稳定性下降,导致能量损失增大,因此并没有出现随 EP 极性的增加,熔宽增大的现象。因此,选择正弦波变极性焊接波形时,焊接参数不能太小,否则会影响焊接质量。图 10 分别为平均电流 80 A 时正弦波变极性和方波变极性 EP 比对焊缝形成的影响规律曲线。

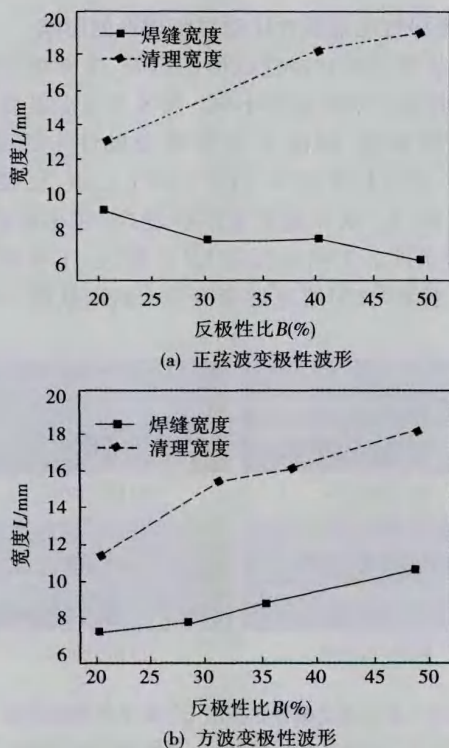


图 10 EP 比对焊缝形成的影响规律
Fig. 10 Effect of EP ratio on weld forming

针对上述 80 A 时正弦波变极性和方波变极性 TIG 焊 EP 极性比对焊缝形成效果不一致的现象,又作了如下试验,采用 6 mm 厚铝合金试板,正、反极性电流均为 190 A 的正弦波形焊接试验。图 11 分别是 EP 比 20%、50% 时焊缝成形。可以看出,随着 EP 比增加,熔宽和清理宽度都有明显的增加。图 12 分别为 EP 比 20%、50% 时焊缝熔深截面图,可以看出,图 12b 的熔深比图 12a 的熔深大,说明在大电流

条件下,正弦波变极性 TIG 焊熔深随反极性比增加而增大。

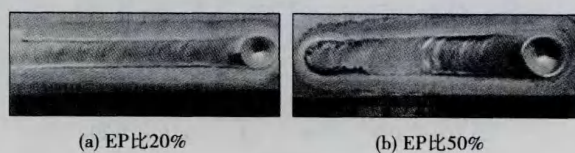


图 11 190 A 时正弦波变极性在不同 EP 比下的焊缝成形
Fig. 11 Welds with different EP ratio of sine wave with 190 A

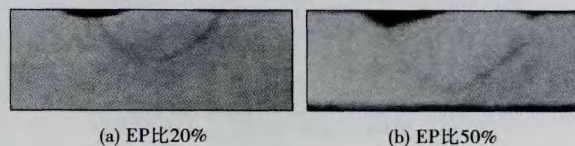


图 12 不同 EP 比下的焊缝熔深
Fig. 12 Welds penetration with different EP ratio

综合 190 A 时不同反极性比下的焊缝成形和熔深,说明,在大规范焊接条件下,由于电弧功率上升,电弧温度增加,即便选择正弦波变极性波形焊接也能保证电弧的稳定性。该试验结果对铝合金变极性焊接时正确选择焊接参数及焊接波形提供理论依据。

4 结 论

(1) 电流电压波形分析发现,铝合金变极性焊接电流小于 80 A 时,正弦波变极性焊接电弧由于极性转换时间过长,电弧稳定性较差。高速摄像分析发现,正弦波变极性反极性期间电弧能量不集中明显发散。

(2) 小规范焊接条件下,方波变极性焊接随 EP 比例的增加熔宽和清理宽度都有增加,证明了铝合金变极性焊接反极性电弧能量大于正极性电弧。而正弦波变极性波形焊接由于反极性电弧过于发散稳定性差,随 EP 比例的增加熔宽反而减小。

(3) 焊接电流 190 A 时由于电弧功率大,正弦波变极性和方波变极性电弧都随 EP 极性时间增加焊接熔宽变大。说明大规范焊接条件下正弦波变极性也能保持电弧稳定性,因此能够将反极性电弧产热大的特性作用于铝合金焊缝。

参考文献:

- [1] 李亚江. 焊接冶金学——材料焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[下转第 59 页]

材交界的位置。

参考文献:

- [1] Taljat B, Radhakrishnan B, Zacharia T. Numerical analysis of GTA welding process with emphasis on post-solidification phase transformation effects on residual stresses [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 246: 45–54.
- [2] Deng Dean, Murakawa Hidekazu. Prediction of welding residual stress in multi-pass butt-welded modified 9Cr-1Mo steel pipe considering phase transformation effects [J]. *Computational Materials Science*, 2006, 37: 209–219.
- [3] Yaghi A H, Hyde T H, Becker A A, *et al.* Residual stress simulation in welded sections of P91 pipes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167: 480–487.
- [4] Dean Deng. FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects [J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 359–366.
- [5] Dean Deng, Hidekazu Murakawa. Influence of transformation induced plasticity on simulated results of welding residual stress in low temperature transformation steel [J]. *Computational Materials Science*, 2013, 78: 55–62.
- [6] Satoh K. Transient thermal stresses of weld heat-affected zone by both-end-fixed bar analogy [J]. *Transactions of the Japan Welding Society*, 1972, 3(1): 125–134.
- [7] Ueda Y, Murakawa H, Ma N. *Welding Deformation and Residual Stress Prevention* [M]. Elsevier, 2012.
- [8] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat source [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1984, B15(2): 299–305.
- [9] Inoue T. Unified transformation-thermo-plasticity and the application [J]. *Journal of Japan Society of Materials Science*, 2007, 56(4): 352–356.
- [10] Kundu A, Bouchard P J, Kumar S, *et al.* Residual stresses in P91 steel electron beam welds [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, 18(1): 70–75.
-
- 作者简介:** 毕涛,男,1987年出生,硕士研究生。主要从事焊接数值模拟和金属材料焊接方面的研究。发表论文1篇。Email: 809958669@qq.com
- 通讯作者:** 邓德安,男,教授。Email: deandeng@cqu.edu.cn
-
- [上接第54页]
- [2] 刘兵,彭超群,王日出,等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 9: 1705–1715.
Liu Bing, Peng Chaoqun, Wang Richu, *et al.* Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 9: 1705–1715.
- [3] Clover F R. Welding of the external tank of the space shuttle [J]. *Welding Journal*, 1980, 59(8): 7–26.
- [4] Nunes A C, Bayless E O. Variable polarity plasma arc welding on space shuttle external tank [J]. *Welding Journal*, 1984, 63(4): 7–35.
- [5] 韩永全,吕耀辉,陈树君,等. 变极性等离子电弧形态对电弧力的影响 [J]. *焊接学报*, 2005, 26(5): 49–52.
Han Yongquan, Lü Yaohui, Chen Shujun, *et al.* Influence of variable polarity plasma arc shape on arc force [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(5): 49–52.
- [6] 李念奎,凌昊,聂波,等. 铝合金材料及其热处理技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [7] 李桓,梁秀娟,宋永伦,等. 铝合金变极性TIG焊电弧行为研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2006, 29(4): 32–36.
Li Huan, Liang Xiujian, Song Yonglun, *et al.* Arc behavior of variable polarity TIG welding for aluminum alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2006, 29(4): 32–36.
- [8] 王宗杰. 熔焊方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] Koichi T, Hideyoshi T. Effect of pressure on the behavior of cathodes spots in oxide removal by arc discharge [J]. *Journal International*, 2006, 46(2): 335–338.
- [10] 安腾宏平,长谷川光雄. 焊接电弧现象 [M]. 施雨湘,译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [11] 韩永全,陈树君,殷树言,等. 铝合金变极性等离子弧电特性 [J]. *电焊机*, 2006, 2: 27–29.
Han Yongquan, Chen Shujun, Yin Shuyan, *et al.* Electrical characteristics of aluminum alloy VPPA [J]. *Electric Welding Machine*, 2006, 2: 27–29.
- [12] Yarmuch M A R, Patchett B M. Variable AC polarity GTAW fusion behavior in 5083 aluminium [J]. *Welding Journal*, 2007, 86(7): 196–200.
-
- 作者简介:** 韩永全,男,1971年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为新型焊接电源及铝合金等离子弧焊接工艺。发表论文20余篇。Email: nmhyq@sina.com