# 铝合金 P-MIG 焊接电流对电弧形态的影响

陆志强<sup>1,2</sup>, 华学明<sup>1,2</sup>, 李 芳<sup>1,2</sup>, 吴毅雄<sup>1,2</sup> (1. 上海交通大学材料科学与工程学院 上海 200240; 2. 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

摘 要:通过对铝镁合金进行脉冲氩弧焊(PMIG),在相同平均电流和平均电压工作条件下,调节不同峰值电流和基值电流,获得了不同的电弧形态.峰值电流对电弧形态有着重要的影响,而基值电流基本没有影响.基值电流是维持电弧燃烧的参数,在基值时间阶段,必须给定一个足够大的基值电流才能维持电弧的稳定燃烧.文中定义了电弧形态的表征值,针对电流对电弧形态表征值的影响进行了分析.峰值电流是决定电弧温度和脉冲能量的重要参数,铝合金电弧充分燃烧时电弧长度、电弧宽度和电弧纵向截面面积随着峰值电流增加而增加.



关键词: 铝合金; 电弧形态; 脉冲氩弧焊; 电流

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2009)12-0105-04

陆志强

0 序 言

目前国内外对于铝合金脉冲 MIG 焊接电弧特 性的研究比较少,并且关于脉冲参数对电弧特性影 响的报道也很少见. 国内学者对铝合金脉冲焊接电 弧的研究方向集中于研究电弧的稳定性,即借助于 目前比较先进的焊接电源得到稳定的钟罩形电 弧<sup>[1]</sup>,而且只局限于对电弧现象的描述. 国外已经 有学者针对这一研究方向做了一定的研究, Ghosh 等人<sup>[2]</sup> 定义了一个无量纲的公式  $\oint = (I_b / I_p) f_{t_b}$ , 主 要研究了电弧形态随着 🖗 和电弧电压变化而变化, 但是对 🖗 能否表征脉冲参数没有做出合理的解释. 铝合金脉冲焊接相对于连续电流焊接来说,增加了 波形的控制,而波形的变化对整个焊接过程来说有 很大的影响,通过调节峰值电流和基值电流得到不 同的电弧形态,获得不同的熔滴过渡方式,有助于改 善焊道成形. 电弧蕴含着不同的信息, 对电弧形态 的掌握,也有助于进一步优化脉冲焊接电源的波形 设计,对铝合金脉冲焊接工艺具有重要的意义.

1 试验方法

试验所用母材为铝合金 5052, 焊丝为铝合金 5356, 焊丝直径为 1.2 mm. 用纯氩作为保护气体, 保

护气体的流量为 15 L/min, 同时采用 DCEP 直流反接 法进行 P-MIG 焊接, 导电嘴到工件距离选取20 mm. 试验采用同步采集分析系统试验装置, 其示意图如 图 1 所示.



图 1 同步采集分析系统试验装置示意图

Fig 1 Diagram of synchronous acquisition and analysis system

对于焊接参数的精确测量,主要通过霍尔电流 电压传感器和信号调理单元以及数据采集卡组成的 采集系统实现.不同脉冲参数条件下的电弧变化过 程通过数字高速摄像系统摄取,同时保证对比试验 过程中 CCD 摄像头的光圈大小、进光量、视场位置 以及摄影频率一致.

试验是在保持平均电弧电压和平均电流不变的

条件下,峰值时间维持在 0.7 ms 时,对基值电流和 峰值电流这两个参数进行 3×3 的全因子试验,研究 其对电弧形态的影响,从而可以得到一个综合影响 规律.具体焊接参数见表 1,其中为了保证平均电流 不变,需要以基值时间 tb 作为调节量.因此,tb 不 视做变量,tb 的变化是被动变化的.

表 1 不同焊接条件下所测的焊接参数 Table 1 Welding parameters at different welding conditions

序 号	平均焊 接电流 I <sub>m</sub> /A	平均电 弧电压 <sub>Um</sub> /V	脉冲上 升时间 <sub>ts</sub> /ms	脉冲下 降时间 <sub>t<sub>d</sub>/ms</sub>	峰值 电流 $I_p/A$	峰值 时间 t <sub>p</sub> /ms	基值 电流 I <sub>b</sub> /A	基值 时间 t <sub>b</sub> /ms	脉冲 频率 <i>f/</i> Hz
1	102.2	21.0	1.0	2.2	380	0.7	50	6.2	98.2
2	101.5	21.3	1.0	2.3	380	0.7	29	4.8	110.2
3	100.8	21.3	1.0	2.4	380	0.7	18	4.0	122.1
4	103.0	21.0	0.9	2.2	325	0.7	50	3.1	140.0
5	103.0	21.2	0.9	2.2	320	0.7	29	2.4	160.3
6	100.0	21.1	1.0	2.2	320	0.7	18	2.0	170.3
7	101.0	21.3	0.9	2.2	265	0.6	50	1.8	163.2
8	99.8	21.3	0.9	2.2	270	0.6	29	1.6	187.9
9	99.8	21.3	0.9	2.2	270	0.6	18	1.1	209.8

# 2 试验结果与分析

## 2.1 不同条件下的电弧形态

在所有脉冲参数中基值电流、峰值电流对电弧 形态有着极其重要的影响,下面主要从峰值时间阶 段和基值时间阶段研究不同的基值电流、峰值电流 对电弧形态产生的重要影响.

# 2.1.1 峰值时间阶段的电弧形态

图 2 是在给定焊接电流 100 A、电弧电压在 21 V 左右,峰值时间 0.7 ms,不同的基值电流(18~50 A) 和峰值电流(265~380 A)条件下高速摄影所采集到 的峰值时间阶段的电弧形态.从图中可以看到内部 电弧和外层气体保护层,而且层次比较分明,内部电 弧是呈现钟罩状的光亮区,外部包围着一层亮度很 高的蓝色火焰,且向四周发散.同时可以看到随着 峰值电流的变化电弧变化明显,而基值电流对其基 本没有影响.

从图 2 中可以看出峰值电流在 270 A 时,电弧 是左右对称的钟罩状电弧,明亮的弧柱在靠近熔池 表面处逐渐扩展直径,焊丝处于电弧的轴向位置,这 说明熔滴过渡方向沿焊丝轴线方向,此时熔滴脱离 焊丝掉入正下方的熔池,过渡形式为脉冲轴向喷射 过渡.当峰值电流在 320 A 时,电弧也基本都成钟 罩状,偶尔会出现电弧偏转,如图 2e 所示,电弧轴线 方向与焊丝轴线有所偏差.当电流为380 A时,电



图 2 不同的基值电流和峰值电流的电弧形态

Fig 2 Arc shapes under different base current and peak current

弧呈现圆锥形,电弧出现偏转,这说明焊丝根部液锥 出现了偏转,出现了类似于脉冲MAG 焊接过程中的 脉冲旋转喷射过渡<sup>[3]</sup>.

当峰值电流从 270 A 提高到 380 A,电弧形态由 左右对称的钟罩状电弧向偏转圆锥形转变,熔滴过 渡特征表现为从脉冲轴向喷射过渡转变为脉冲旋转 喷射过渡,脉冲旋转喷射过渡用于焊接角焊缝与窄 间隙焊,有助于改善侧壁<sup>(4)</sup>.上述峰值电流、电弧形 态和过渡方式的关系为实际焊接工艺中参数的合理 选择提供了理论依据.

2.1.2 基值时间阶段的电弧形态

在基值时间阶段,不同基值和峰值电流条件下 的电弧形态也是不一样的.图 3 是电弧电压在 21 V 左右和平均电流在 100 A 左右,通过高速摄影得到 的基值时间阶段电弧形态.从图 3a,d 对比中可以 看出,由于峰值电流的差异,在基值时间阶段,图 3a 电弧不是在焊丝端部的正下方,而是沿倾斜方向伸 出燃烧,而且做旋转运动,是偏转的旋转电弧,图 3d 电弧是在焊丝端部的正下方燃烧.但是两幅图电弧 都能维持良好的燃烧,这说明峰值电流的变化对能 否维持电弧燃烧的影响不大.

从图 3a 中可以看出基值电流在 50 A 左右,基 值时间阶段电弧仍然保持燃烧的状态,在阳极顶部 表面有个特别亮的微小区域,外面包围着一层亮度





(a)  $I_{\rm b}$ =50 A,  $I_{\rm p}$ =380 A



(c)  $I_{\rm b}$ =18 A,  $I_{\rm p}$ =380 A

(d)  $I_{\rm b}{=}50$  A,  $I_{\rm p}{=}270$  A



Fig. 3 Arc shapes in pulsed off period under different based current condition

很高的燃烧火焰.随着基值电流的减小,可以看到 电弧不能很好地维持电弧燃烧状态,当基值电流为 29 A时(图 3b),阳极斑点亮度变暗,电弧外面的淡 蓝色火焰基本消失.当基值电流为 18 A时(图 3c), 电弧极其微弱,有熄弧的可能性.在基值时间阶段, 当基值电流过小,此时的电弧电压就比较小,从而影 响弧长.同时,当基值电流过小,电弧径向力和向外 扩张力就会过小,将无法维持电弧燃烧.因此,要想 维持电弧的燃烧,必须要给定一个足够大的基值电 流,在上述试验条件下,基值电流必须大于 18 A. 2.2 电流对电弧形态表征值影响的分析

电弧形态主要通过电弧长度、电弧水平宽度、电 弧纵向截面面积来表征,如图4所示.表征值的精 确测量通过IABVIEW软件的图像处理(Vision)模块



L 电弧长度; H 焊枪高度; S 电弧纵向截面面积; D 电弧水平宽度 图 4 电弧形态测量示意图

Fig 4 Sketch diagram of arc shape measurement

来实现. 主要对电弧光亮区的边缘检测, 然后进行 宽度、长度和面积计算.

图 5 为在给定焊接电流 100 A、平均电弧电压在 21 V 左右,不同峰值电流条件下电弧长度随基值电 流的变化曲线.图 6 为不同基值电流条件下电弧长 度随峰值电流的变化曲线.



#### 图 5 弧长随基值电流变化曲线







从图 5 和图 6 中可以看出弧长基本不随基值电 流的变化而变化,而随着峰值电流的增大而明显增 大.铝合金脉冲焊接过程中,即使电弧电压保持基 本不变的情况下,峰值电流发生变化电弧长度也会 发生变化.由于熔滴过渡发生在脉冲时间阶段,对 于铝合金脉冲焊接来说影响弧长的并不仅仅是电弧 平均电压,最主要的是受峰值电压影响.大的峰值 电压对应大的峰值电流,该焊接电源设计是基于电 弧静特性曲线以及维持电弧稳定燃烧而设计的<sup>5.6]</sup>. 对于不同峰值电流的焊接过程来说,在峰值时间阶 段,峰值电流越大,对应峰值电压也越大,弧长也增 加.

图 7 为电弧纵向截面面积与基值电流和峰值电 流的关系. 从图 7 中可以看出, 当峰值电流恒定时, 电弧纵向截面面积随着基值电流的增加有缓慢增加 的趋势. 而当基值电流恒定时, 该面积随着峰值电 流的增加而剧烈增加.



- 图 7 电弧纵向截面面积与基值电流和峰值电流的关系
- Fig. 7 Relation ship of arc vertical section area with base/ peak current

焊接电弧的能量主要来自电源提供的电能,该 能量在电弧中转变为热能、光能、磁能和机械能等. 虽然在上述每组试验过程中平均电压和平均电流保 持不变,单位时间平均能量不变,但峰值脉冲能量变 化.脉冲能量主要跟脉冲时间阶段的峰值电压、峰 值电流、峰值时间有关,当峰值电流的值变大时,脉 冲能量就增加.因此,不仅熔滴熔化速率和熔滴尺 寸增大,电弧中转变成的热能和光能也会增加,从而 电弧纵向截面面积增大.另外,峰值电流越大,脉冲 能量增加,电弧弧柱区温度随着能量的增加而增加. 电弧弧柱径向温度分布表达式<sup>(4)</sup>为

$$T = T_0 - \frac{EI}{2\pi K} \ln \frac{r}{r_0} \tag{1}$$

式中: T<sub>0</sub> 为基准温度; r 为距弧柱中心的距离; r<sub>0</sub> 为 温度 T<sub>0</sub> 时 r 的值; K 为比例常数; E 为电场强度; I 为电流.对于不同焊接过程的峰值时间阶段,峰值 电流的增加,峰值电弧电压增加,使电场强度增加, 式(1)中的 E 和I 同时增大.达到某一温度值的 r 值增大,从而使高温区越来越向外围扩展,电弧空间 的热能增加,电弧纵向截面面积和弧宽就增加.可 以得出,峰值电流的增大,使得弧长增加,从而熔滴 尺寸增加.同时脉冲能量的增加影响熔滴熔化速 率.因此,峰值电流与脉冲能量和电弧弧柱温度有 关,从而影响电弧形态,通过对电弧蕴含信息的处 理,有助于优化数字化焊接设计与控制.

# 3 结 论

(1) 铝合金 P-MIG 焊接过程中,维持平均电流 100 A、电弧电压 21 V 和峰值时间 0.7 ms 的情况下, 以基值时间作为应变量,调节主要参数峰值电流和 基值电流,可以实现对电弧形态的调节.

(2)当峰值电流从 270~380 A,电弧由钟罩状向圆锥形变化,熔滴过渡特征表现为从脉冲轴向喷射过渡转变为脉冲旋转喷射过渡.

(3)峰值时间阶段弧长、弧宽和电弧纵向截面 面积随着峰值电流的增加而显著增加,基值电流对 电弧形态基本没有影响.维持电弧燃烧的条件是给 定一个足够大的基值电流,在上述试验条件下,基值 电流必须大于18 A.

(4) 铝合金脉冲焊接过程中,峰值电流与脉冲 能量和电弧焊接弧柱温度有关,使得电弧形态变化 显著.

## 参考文献:

- 丁 韦,候启孝,董玲萱. 铝合金脉冲 MIG 焊电弧稳定性[J]. 焊接学报, 1996, 17(2): 115-121.
   Ding Wei, Hou Qixiao, Dong Lingxuan. Are stability of aluminum alloy pulsed MIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1996, 17(2): 115-121.
- Ghosh P K, Dom L Hubner M aro *et al*. Are characteristics and behavior of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminum alloy[J]. Journal of M aterials Processing Technology, 2007, 194(1-3): 163-175.
- [3] 黄 炜,艾 盛. MAG 焊脉冲电流控制旋转喷射过渡[J].焊 接学报, 1996, 17(3): 145-149.
  Huang Wei, Ai Sheng, Pulsed rotating-spray transfer during MAG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1996, 17(3): 145-149.
- [4] Kim Y S, Eagar T W. Metal transfer in pulsed current gas metal arc welding [J]. Welding Journal, 1993, 72(7): 279–287.
- [5] 王 宝. 焊接电弧物理与焊条工艺性设计[M]. 北京, 机械工 业出版社, 1998.
- [6] 安藤弘平,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.

作者简介: 陆志强, 男, 1983 年出生, 硕士. 主要从事数字化焊接 电源、铝合金焊接工艺和焊接过程智能控制等方面研究.

Email: John 1 18899 @gmail. com

### Numerical simulation of slit type cracking test for 9% Ni steel

BAI Shiwu<sup>1,2</sup>, LI Wushen<sup>1</sup>, YAN Chunyan<sup>1,3</sup>, YIN Zhanghua<sup>2</sup>, HUANG Fuxiang<sup>2</sup> (1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Petroleum-Gas Pipeline Research Institute of China, Largfang 065000, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China). p 93–96

**Abstract:** With SYSWELD software, the temperature and stress field of 9% Ni steel Y-slit weldments with different preheat temperatures were simulated by applying double-ellipsoid heat source. Distribution laws of welding temperature and stress field were studied. Effects of preheat temperature on welding heat cycles and residual stress were analyzed. Results show that with increasing preheat temperature, cooling rate decreases facilitates escaping of hydrogen and self-tempering of martensite, the average stress level and cold-cracking susceptibility of the weldments increase, so high preheat temperature shall be avoided for 9%Ni steel welding.

Key words: 9% Ni steel; slit type cracking test; preheat temperature; temperature field; stress field

Analysis on heat-affected zone toughness of railroad freight TCS345 stainless steel weld joints WANG Baosen, MA Zhaohui, ZHU Shuangchun, XU Ke (Research Institute, Baosteel Iron & Steel Co. Ltd. Shanghai 201900, China). p 97–100

**Abstract:** The transformation temperature phase diagram of 12% chromium steel is obtained by using Thermal-cal software. Process of welding 12% chromium stainless steel is analysed with the phase transformation temperature scope. The heat-affected zone (HAZ) of the weld joints is observed with optic microscope and scanning electronic microscope, which the microstructure consists of ferrite, martensite, coarse grain heat-affected zone (CGHAZ), fine grain heat-affected zone (FGHAZ) and Ti(C/N). The key elements that affect toughness of CGHAZ are ferritic grain size and martensitic content. The base material has the best impact toughness when grain size of Ti(C/N) reaches 2–5  $\mu$ m. The lowest ductility-brittle transition temperature in CGHAZ is -22 °C when content of carbon plus nitrogen in base material is about 0. 02% and martensitic content in CGHAZ is 40% under some certain welding procedure.

Key words: chromium ferritic stainless steel; coarse grain heat affected zone; impact toughness

Microstructural formation of austenitic stainless steel joint by capacitor discharge welding XU Feng<sup>1,2</sup>, XU Jirfeng<sup>2</sup>, ZHAI Qiuya<sup>2</sup>(1. School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhorg 723003, China; 2. Xi an University of Technology, Xi an 710048, China). p 101–104

Abstract: The 0Cr18Ni9 austenitic stainless steel sheet with 0.2 mm thickness was welded in capacitor discharge spot welding. The temperature field and cooling rate of nugget was calculated. The results show that the joint microstructure consists of nugget zone and semi-melt zone. Due to very short time in welding, the cooling rate of the joint reaches to 5.  $1\times10^6\,{\rm K/s}$ , the growth of austenite microstructure is impeded, and the microstructure of the nugget is refined.

which has rapidly solidified characteristics. As the austenite microstructure of the nugget stays in temperature province of activation with very short time, the chrome of austenite grain boundary precipitations is checked. To obtain the high quality spot-weld joint, the welding parameters are determined as; welding voltage 80 V, capacitor 6 600  $\mu$ F and electrode pressure 18 N.

Key words: austenitic stainless steel; capacitor discharge welding; spot-weld joint

Analysis for the influences of aluminum alloy P-MIG welding parameters on welding arc IU Zhiqiang<sup>1,2</sup>, HUA Xueming<sup>1,2</sup>, II Fang<sup>1,2</sup>, WU Yixiong<sup>1,2</sup> (1. Material and Science Engineering Department Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. The Key Laboratory of Laser Processing and Material Modification of Shanghai, Shanghai 200240, China). p 105–108

Abstract Under the same average welding current and welding voltage, by regulating the different based current and peak current, the Al-Mg alloy was welded with Al-Mg filler wire. The photos of welding arc were obtained by using high-speed video photography. Peak current has great influence on the shape and characteristics of the arc. With increasing the peak current value, rotated arc appears and pulsed rotated metal transfer behavior occurs. Based current has little influence on the arc shape. Base current is the important parameter for keeping arc burning. At pulse off time, it must be given base current value which is large enough to keep the arc burning stably. In this study, the arc shape is defined by arc length, arc width and arc portrait cross-section area, which will be influenced by the weld current. Peak current is important parameter of arc temperature and pulse energy. The study shows that when the arc is burning at pulse on time, the arc length, arc width and arc portrait cross-section area increase with raising peak current.

Key words: aluminum alloy; arc shape; pulsed-insert gas welding; current

Welding technology and microstructure of MIG welded magnesium alloy WANG Peng. SONG Gang, LIU Liming (School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China). p 109–112

Abstract The pulsed MIG welding was used to weld AZ31B Mg alloy, and the weldability of the alloy was studied. The microstructure, mechanical property and hardness of the welded joint were investigated via the metal phase microscopy, scanning electron microscope, tensile testing machine and hardness instrument. The results show that one-side welding with back can be obtained through this technique at optimized parameters when there was no groove and no shaped ban, which continuous butt joints have no surface defects. The heat-affected zone of the joints is narrow, and the grains of the zone are slightly larger than that of the base metal. The grains of fusion zone are tiny, the microstructure is homogeneous and the hardness of welded joint is higher than that of the base metal. The tensile strength is up to 95% of the base metal.

Key words: pulsed MIG welding; magnesium alloy; welding process; microstructure