#### DOI: 10.3901/JME.2010.20.076

# 双旁路耦合电弧铝合金 MIG 焊熔滴过渡形态研究<sup>\*</sup>

石 玗1 陈作雁1 薛 诚1 刘效沛2 张裕明2

(1. 兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室 兰州 730050;2. 肯塔基大学生产制造中心和电气工程学院 列克星敦 40506 美国)

摘要:提出双旁路耦合电弧熔化极惰性气体保护(Dual bypass metal inert-gas, DB-MIG)电弧焊方法并建立试验系统。该方法 以传统熔化极惰性气体保护焊接电弧为主弧,引入两路对称的电流可控的非熔化极旁路电弧并与主弧形成耦合电弧进行焊 接。由于旁路电弧的分流作用,在保持较高焊丝熔化电流的同时可有效降低母材输入电流,并且旁路电弧力的作用对熔滴过 渡也有显著的影响。设计专用的窄带滤光系统,实现无激光背光的焊接熔滴过渡行为的高速摄像,获得不同旁路电流参数条 件下的铝合金 DB-MIG 焊熔滴过渡的高速摄影图像并进行分析。试验结果表明总电流恒定的情况下,熔滴过渡形态随旁路电 弧电流参数改变而改变。对 DB-MIG 焊条件下作用于熔滴上的电弧力的分布进行理论分析,解释试验现象,理论分析和研究 表明双旁路耦合电弧可以促进熔滴过渡并可显著降低喷射过渡的临界电流。

关键词: 旁路耦合电弧 MIG 焊 熔滴过渡 铝合金 中图分类号: TG409

## **Research on Metal Transfer in Dual Bypass MIG Welding of Aluminum**

SHI Yu<sup>1</sup> CHEN Zuoyan<sup>1</sup> XUE Cheng<sup>1</sup> LIU Xiaopei<sup>2</sup> ZHANG Yuming<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050;

2. Center for Manufacturing, University of Kentucky, Lexington 40506, USA)

**Abstract:** The dual bypass metal inert gas (DB-MIG) arc welding method is presented and an experimental system is established. In this method, a conventional MIG welding arc is used as main arc and two symmetrical TIG welding arcs with controllable current are introduced as bypass arc. A coupled arc is formed by main and bypass arcs to carry out welding. Due to the shunt effect of bypass arc, base metal input current can be decreased effectively while wire melting current keeps high, and bypass arc force has great influence on metal transfer. A special narrow-band-filter system is built to realize high speed video of metal transfer behaviors without laser backlight, and high speed photographic images under different bypass current parameter conditions are obtained. Analysis results show that metal transfer mode changes with the change of current parameters of bypass arc. Then the changes in the forces acting on the droplet and the effects of these changes on the metal transfer behaviors are analyzed and the experimental phenomena are explained. Analysis shows that the bypass arcs and currents lower the critical current needed to achieve the desired spray transfer **Key words:** Dual bypass arcs MIG welding Metal transfer Aluminum alloy

0 前言

在人们日益关注社会的可持续发展和环境保 护的今天,交通运输工具已是城市环境污染的大户 之一。为减少燃料消耗和环境污染,交通运输工具 正努力向轻量化方向发展<sup>[1]</sup>。铝合金相比于传统制 造交通运输工具的材料,具有一系列无可比拟的优 越特性,是实现交通运输工具轻量化、高速化和现 代化的理想的环保型材料<sup>[2]</sup>。铝合金焊接技术的发 展对保证这些产品的质量有着密切的联系,对于生 产中应用最为广泛的铝合金熔化极气体保护焊而 言,熔滴过渡方式对电弧稳定性、焊缝成形、熔池

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(50805073)、国家自然科学基金国际合作 (50710105060)和兰州理工大学优秀青年教师培养计划(Q200901)资 助项目。20091229 收到初稿,20100522 收到修改稿

形态和焊丝熔化都具有重要的影响,通常认为射滴 过渡较为理想<sup>[3]</sup>,但为了实现射滴过渡,焊接电流 需要超过临界电流。而铝合金焊接过程对热输入非 常敏感,导致往往很难得到合适的焊接规范。采用 脉冲焊方法能够较好地实现金属焊丝惰性主体保护 (Metal inert-gas, MIG)焊熔滴过渡的控制<sup>[4-5]</sup>,但脉 冲焊接过程规范匹配区间窄,高速或高效焊接时波 形和熔滴过渡稳定性差<sup>[6]</sup>。

文献[7]首先提出了基于旁路电弧的双电极熔 化极气体保护焊(Double-electrode gas metal arc welding, DE-GMAW)方法,并发现旁路电弧对熔 滴过渡过程有重要的影响,可以在临界电流以下获 得稳定的射滴过渡。在此基础上提出了双旁路耦合 电弧熔化极惰性气体保护(Dual bypass metal inertgas, DB-MIG)焊方法<sup>[8]</sup>,可以通过控制旁路电弧参 数在不改变焊丝熔化总电流的情况下控制熔滴过渡 过程。通过试验研究了不同旁路电弧参数下熔滴过 渡过程,并分析了旁路电弧对作用于熔滴上电弧力 分布的影响,为进一步分析和建立 DB-MIG 焊熔滴 过渡模型奠定基础。

## 1 试验系统

### 1.1 双旁路耦合电弧 MIG 焊系统

双旁路耦合电弧 MIG 焊试验系统的结构如图 1 所示。



图 1 双旁路耦合电弧 MIG 焊试验系统结构

系统组成包括:一台恒压焊接电源连接一把 GMAW 焊枪用于产生主弧和送进焊丝、两台恒流焊 接电源连接两把钨极惰性气体保护焊(Gas tungsten arc welding, GTAW)焊枪用于产生旁路电弧。主弧和 两个旁路电弧复合后形成耦合电弧。根据戴维南定 律可知

$$I_{\rm B} = I_{\rm W} - I_{\rm L} - I_{\rm R} \tag{1}$$

式中, *I*<sub>B</sub>为流入母材中的电流, *I*<sub>W</sub>为流过焊丝的电流, *I*<sub>L</sub>为左旁路电流, *I*<sub>R</sub>为右旁路电流。由式(1)可知, 双旁路耦合电弧 MIG 焊系统可以保证较大的焊

丝熔化电流的同时却可以显著降低焊接热输入。为 了保证耦合电弧的对称性,两路旁路电流在试验过 程中取相同设置。

焊接前需要调整旁路焊枪和主路焊枪之间的 位置和夹角,使耦合电弧能够稳定燃烧。主路电弧 弧长由电弧自调节作用保持稳定,而旁路电弧电流 的大小会影响主路电弧的稳定工作点,因此主路电 弧稳定焊接时的弧长会随旁路电流大小的变化而变 化。图 2 是铝合金焊丝熔化总电流 230 A,左右旁 路耦合电弧电流各为 100 A 时双旁路耦合电弧 MIG 焊的电弧形态照片。



图 2 双旁路耦合电弧 MIG 焊电弧形态

图 3 是一次铝合金焊接试验过程中实测的电流 分配情况。从图 3 中可以看出焊丝熔化电流达到 230 A,而流过母材的电流只有 30 A 时仍能保证焊接过 程稳定。



图 3 双旁路耦合电弧 MIG 焊电流分配

#### 1.2 熔滴过渡数字高速摄像系统

为了在无激光背光条件下实现熔滴过渡高速 摄像,需要设计窄带滤光系统滤除弧光的干扰。根 据文献[9]的研究结果,氩气保护下的焊接电弧光谱 在 600~700 nm 范围时氩的谱线较弱,电弧光基本 上为强度较低的连续光谱。通过以上分析将滤光波 段的范围确定在 600~700 nm 范围内进行试验。分 别选用 610 nm、635 nm、660 nm、685 nm 窄带滤 光片对熔滴过渡拍摄效果进行了试验。经过对比发 现在滤光参数为 685 nm±10 nm 时,可以在射滴过 渡时获得清晰的熔滴图像。

## 2 熔滴受力情况分析

熔滴上的作用力是影响熔滴过渡的主要因素, 熔滴上的作用力主要有:重力 Fg、表面张力 Fo、电 磁力 Fem、等离子流力 Fa、斑点力 Fv等<sup>[10]</sup>。根据静 力平衡理论,这些作用力的平衡状态决定了熔滴过 渡过程。图 4 为熔滴上的作用力的示意图。



图 4 熔滴上的作用力

熔滴上作用力的静力平衡方程描述如下

 $F_{g} + F_{a} + F_{em} = F_{\sigma} + F_{v} \tag{2}$ 

表面张力和斑点力 *F*<sub>v</sub> 阻碍熔滴过渡,而重力 *F*<sub>g</sub>、等离子流力 *F*<sub>a</sub> 促使熔滴从焊丝端部脱离。弧根 直径 *d*<sub>a</sub>的大小决定 *F*<sub>em</sub>的方向,如果弧根直径小于 熔滴直径,*F*<sub>em</sub> 将阻碍熔滴过渡;反之,若如果弧 根直径大于熔滴直径,*F*<sub>em</sub> 将促使熔滴过渡。根据 文献[8]对焊接电流 300 A 时铝合金 MIG 焊喷射过 渡熔滴作用力大小的计算与试验分析,可知喷射过 渡时阻碍熔滴的主要作用力为表面张力,而促进熔 滴过渡的主要作用力为电磁收缩力。而只有在临界 电流以上,弧根扩展后才使电磁收缩力由熔滴过渡 的阻力变为驱动力。

对于本文建立的双旁路耦合电弧 MIG 焊方法, 其熔滴上的作用力分布如图 5 所示。



产生如下明显的影响:首先旁路电弧产生的电磁力 F<sub>emr</sub>和 F<sub>eml</sub>的径向分力会加速熔滴的缩颈,而轴向 分力会促使熔滴的脱离;其次由于旁路电弧使主弧 弧根很容易就产生扩展并包围熔滴,因此使作用于 熔滴上的电磁力方向驱使熔滴过渡,并且作用力变 强;最后,旁路电弧会对从熔滴上方流向下方的等 离子气流产生加速作用,从而促使等离子流力变大, 有利于熔滴脱离焊丝。综合几方面的因素可知由于 旁路电弧的作用,将促使熔滴过渡过程,因此可以 在低于传统 MIG 焊临界电流条件下实现喷射过渡。

## 3 试验结果与分析

#### 3.1 试验过程

焊接采用 Ø 0.8 mm 铝合金 ER4047 焊丝,焊丝 熔化电流为 160 A,主路焊接电压 21.5 V,送丝速 度 18.6 m/min,焊接速度 240 cm/min,氩气保护, 气体流量 12 L/min,母材为 6061 铝合金。进行了 5 组不同旁路电弧电流的焊接试验,旁路电弧电流参 数如下表所示。利用高速摄像机和复合滤光系统记 录不同旁路电弧电流条件下的熔滴过渡过程。

表 试验采用的旁路电弧电流参数

组号	旁路电弧电流参数 I/A(左右旁路电弧电流取相同值)
1	0
2	30
3	40
4	50
5	60

#### 3.2 试验结果

第1组到第5试验条件下的熔滴过渡情况如图 6~10所示。



图 6 第1组试验参数的熔滴过渡(每帧间隔 1 ms)



图 7 第 2 组试验参数的熔滴过渡(每帧间隔 2.5 ms)



图 8 第 3 组试验参数的熔滴过渡(每帧间隔 1 ms)



图 9 第 4 组试验参数的熔滴过渡(每帧间隔 1.5 ms)



图 10 第 5 组试验参数的熔滴过渡(每帧间隔 0.5 ms)

由图 6 可知, 在第 1 组试验相当于普通的 MIG 焊接, 在总电流 160 A 下为典型的短路过渡过程。 在此条件下的焊缝成形良好。第 2 组试验条件下由 图 7 可知,由于旁路电弧的影响,熔滴形态向大滴 过渡转变,但旁路电弧电流较小,弧根没有得到有 效扩展,使得电磁力仍然为熔滴过渡的阻力,由于 焊丝的熔化导致熔滴尺寸不断长大,最后伴随焊丝 的送进,熔滴与熔池接触后实现短路过渡过程。该 组试验条件下的焊缝成形较差。以上两组试验中的 熔滴过渡均伴随着较大的飞溅。

随着左右旁路电弧电流的持续增大到 40 A,由 图 8 所示,熔滴尺寸变小,虽然仍然为短路过渡过 程,但整个熔滴过渡周期中的短路时间非常短,熔 滴刚与熔池接触就可以实现从焊丝快速脱离,并平 稳过渡到熔池中去。整个过渡过程类似于铝合金焊 接的亚射流过渡。整个焊接过程飞溅很少,焊缝成 形良好。

当左右旁路电弧电流增大到 50 A 后, 熔滴过渡 过程如图 9 所示转变成颗粒较大的自由过渡。焊接 过程十分稳定, 焊缝成形良好。每当新的熔滴产生 后, 电弧可迅速实现"跳弧", 弧根很平稳地从熔 滴底部跳到缩颈的位置, 从而使弧根包裹整个熔滴, 促使熔滴迅速脱离焊丝。熔滴过渡频率为 150~200 滴/s。

图 10 为左右旁路电弧增大到 60 A 后的熔滴过 渡过程。可以明显地观察到该组焊接试验为喷射过 渡过程。熔滴从长大、产生缩颈、发生跳弧到脱离 焊丝整个过程十分稳定,熔滴尺寸均匀,整个焊接 过程无飞溅,焊缝成形好,焊缝波纹十分细密,熔 滴过渡频率为 400~600 滴/s。

通过以上 5 组试验可知,提出的 DB-MIG 焊系 统在焊接总电流不变的情况下,通过调节旁路电弧 电流可以改变作用于熔滴上的电弧力分布和电弧形 态从而获得不同的熔滴过渡过程,降低喷射过渡的 临界电流值。通过采用适当的旁路电弧焊接电流参数,可以获得稳定的无飞溅的喷射过渡过程,并得到成形良好的焊缝。同时利用调节旁路电弧参数还可以在保证稳定熔滴过渡的条件下控制焊缝的热输入和熔深,为获得高质量的铝合金焊缝创造了条件。

## 4 结论

(1) 建立的铝合金 DB-MIG 焊系统实现了熔化 焊丝热输入和母材热输入的解耦控制,可以获得低 的母材热输入和高的焊丝熔化速度的理想焊接过 程,从而可以有效降低焊接热影响区和控制焊接变 形,并实现铝合金高效焊接过程。

(2) 旁路电弧可以显著地影响作用于熔滴上的 电弧力的大小和分布。其主要作用为促进熔滴过渡, 降低喷射过渡临界电流值。

(3) 试验证明在总焊接电流恒定的条件下,通 过改变 DB-MIG 焊系统中旁路电弧电流参数,可以 改变熔滴过渡过程,在保证耦合电弧稳定的条件下, 旁路电弧电流越大越容易产生喷射过渡。

#### 参考文献

- MERKLEIN M, GEIGER M. New materials and production technologies for innovative lightweight constructions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 45(5): 532-536.
- [2] JOSEPH C, BENEDYK K. Light metals in automotive applications[J]. Light Metal Age, 2000, 10(2): 34-35.
- [3] DASILVA C L M, 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] 符卫, 胡绳荪, 尹玉环. 熔滴过渡对脉冲熔化极氩弧焊 快速成形的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 95-99.
  FU Wei, HU Shengsun, YIN Yuhuan. Effect of droplet transition on rapid prototyping by P-MIG[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 95-99.
- [5] 杨运强,李俊岳,张晓囡,等.脉冲 MIG 焊熔滴过渡 控制的新进展[J]. 机械工程学报,2002,38(11):12-16. YANG Yunqiang, LI Junyue, ZHANG Xiaonan, et al. New development of droplet transfer control in pulsed MIG welding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(11): 12-16.
- [6] PRAVEEN P, YARLAGADDA P K D V, KANGB M J. Advancements in pulse gas metal arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165: (下转第 85 页)

thermoplastic deformation on mechanical properties of Zr-based bulk metallic glasses at room temperature[J]. Mech. Sci., 2008, 50: 888-896.

- [14] LI F, DAI L H, BAI Y L. Behavior of multiple shear bands in Zr-based bulk metallic glass[J]. Mater. Chem. Phys., 2005, 93: 174-177.
- [15] ANTUNES J M, MENEZES L F, FERNANDES J V. Three-dimensional numerical simulation of Vickers indentation tests[J]. Solids Struct., 2006, 43: 784-806.
- [16] ZHANG H W, JING X N, GHATU S. Investigation of shear band evolution in amorphous alloys beneath a Vickers indentation[J]. Acta Mater., 2005, 53: 3849-3859.
- [17] NARASIMHAN R. Analysis of indentation of pressure sensitive plastic solids using the expanding cavity

model[J]. Mech. Mater., 2004, 36: 633-645.

- [18] 闫志杰, 塑性变形诱导非晶合金的微观结构变化[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
  YAN Zhijie. Microstructure evolution in metallic glasses induced plastic deformation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006.
- [19] LEE S W, HUH M Y, FLEURY E. Crystallization-induced plasticity of Cu-Zr containing bulk amorphous alloys[J]. Acta Mater., 2006, 54: 349-355.

作者简介: 拓雷锋, 男, 1984 年出生。主要研究方向为非晶合金塑性变 形数值模拟。 闫志杰(通信作者), 男, 1974 年出生, 教授, 硕士研究生导师。主要研 究方向为凝固技术及新材料。

E-mail: yanzhijie74@sohu.com

(上接第79页)

1113-1119.

- [7] LI Kehai, CHEN Jinsong, ZHANG Yuming. Double electrode GMAW process and control[J]. Welding Journal, 2007, 86(8): 231-237.
- [8] SHI Yu, LIU Xiaopei, ZHANG Yuming, et al. Analysis of metal transfer and correlated influence in Dual Bypass GMAW of aluminum[J]. Welding Journal, 2008, 87(9): 229-236.
- [9] LI Pengjiu, ZHANG Yuming. Analysis of arc light

mechanism and its application in sensing of the GTAW process[J]. Welding Journal, 2000, 79(9): 252-260.

[10] WASZINK J H, PIENA M J. Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW[J]. Welding Journal, 1986, 65(11): 289-298.

作者简介:石玗,男,1973年出生,博士,副教授。主要研究方向为焊接过程自动控制及高效焊接技术,发表论文 50 余篇。 E-mail: shiyu73@gmail.com