

# 通过 CBT 方法开发低热输入低飞溅 CO<sub>2</sub>/MAG 交流焊接系统

上山智之

(日本 OTC 焊接机器人公司,上海 200120)

**摘要:**OTC(DAIHEN Corporation)公司新研发的 CBT 焊接控制法实现了 GMA 焊接的低飞溅和低热输入,特别是针对薄板,进一步提高了薄板的焊接性能,这对早期的传统焊接控制技术来说是很难实现的。通过调节负极占空比,交流 CBT 控制法能够实现改变焊接过程中的熔深和熔敷量,有效避免了薄板焊接中的烧穿和降低热变形问题。新开发的反抽起弧控制确保了起弧的成功率并有效抑制飞溅的发生。

**关键词:**CBT 焊接控制法;负极占空比;反抽起弧控制;交流伺服

中图分类号: TG444<sup>+</sup>.73

文献标识码: A

文章编号: 1001-2303(2009)09-0010-05

## Development of low heat input and spatter reduction CO<sub>2</sub>/MAG alternating current welding system by controlled bridge transfer process

Tomoyuki Ueyama

(DAIHEN Corporation, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** The newly developed "Controlled Bridge transfer(CBT)" welding control method further achieved the ideal Gas Metal Arc (GMA) welding evolution of low spatter performance and low heat input, especially improved the welding quality of thin sheet material. Previously, it was very difficult to achieve by conventional welding control technology. By adjusting the polarity ratio (EN ratio) between electrode positive(EP) and electrode negative(EN), AC-CBT method made it possible to freely change the depth of penetration and the metal deposition during welding, and efficiently avoid burning through and heat distortion of thin sheet welding. The new Retract Start (RS) control ensures proper arc starts and spatter reduction at the start of the arc.

**Key words:** welding method of controlled bridge transfer; EN ratio; retract start control; AC servo

### 0 前言

以 CO<sub>2</sub>/MAG 焊接为代表的熔化极气体保护焊 GMA(Gas Metal Arc)由于生产效率高在焊接施工被广泛使用,但是飞溅相对比较多。完全消除飞溅是 GMA 焊接永恒的课题,一直以来都在进行研究和开发<sup>[1-5]</sup>。尤其是汽车以及摩托车行业,为了使车体更加轻便,在减小板厚的同时,通过降低焊接过程中发生的飞溅,而改变环境、提高焊接品质以及降低生产成本的呼声很高。因此,为了避免因使用薄板而引起焊穿的问题,对能够降低母材热输入、无飞溅焊接法的市场需求越来越高。在此背景下,OTC 公司开发了能够实现 GMA 焊接的低飞溅和低热输

入的新焊接控制方法(Controlled Bridge Transfer 法,以下简称 CBT),使超薄板低飞溅焊接成为可能<sup>[6]</sup>。

超薄板车体的焊接以电阻焊为主。电阻焊的缺点是焊钳大且重,需要使用可搬质量 100 kg 以上的大型机器人,投资成本很高。另外,焊接车体内侧时,焊钳容易和车体干涉,车体设计和示教受到制约。使用可搬重量 6 kg 以下的小型机器人,且焊枪比较简单的电弧焊,可以解决这些缺点。针对这方面的应用,三田等人提出了交流 MAG 焊接工艺<sup>[7]</sup>,可是低飞溅交流焊接工艺还没有被提出。另外,要用 GMA 完全取代焊接长度短、焊接部位多的电阻焊,需要可靠的引弧性能和引弧后稳定地切换为低飞溅焊接的技术。

因此,开发了采用应答性能高的 AC 伺服电机,提高了焊丝送丝性能,在起弧后瞬间发挥低飞溅性

收稿日期: 2009-01-14

作者简介: 上山智之(1961—),男,日本,博士,日本 OTC 公司焊接事业部第二技术部部长。

能的同时,提高了传统的 CBT 方法的热输入控制性能的低热输入低飞溅 CO<sub>2</sub>/MAG 交流焊接系统,在此介绍其应用效果。

## 1 交流 CBT 方法实现低飞溅、低热输入

### 1.1 交流 CBT 方法的原理

对提高热输入控制性能的交流 CBT 法(AC-CBT 法)进行说明。图 1 表示使用保护气体为  $w(\text{Ar})80\%+w(\text{CO}_2)20\%$  的混合气体,焊丝直径 1.2 mm 的实心焊丝(相当于 YGW12),使用传统 CBT 方法焊接,电源的输出极性分别为为 EP(Electrode Positive, 直流反接)和 EN(Electrode Negative, 直流正接),焊丝熔化速度差的比较结果。

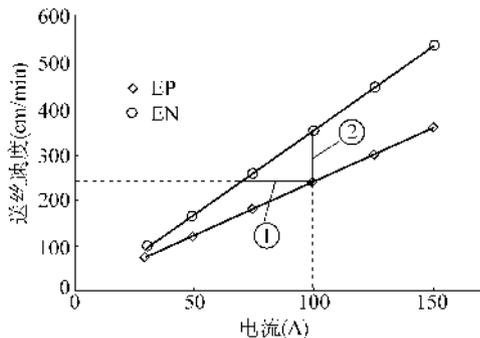


图 1 焊丝熔化速度的比较

两种输出极性焊丝的熔化速度不同,在电流 75 A 以上时,EN 极性的焊丝熔化速度为 EP 极性的 1.5 倍。即,如果实现不同极性焊丝熔化的中间状态,就可以提高对母材热输入控制性能。因此,有两种控制方法:改变平均电流从而保持焊丝熔化速度恒定(图中①的箭头)和保持平均电流不变而改变焊丝的熔化速度。在此为了定义中间状态,引入交流频率  $f_{AC}$ (单位:Hz),EN 比率  $R_{EN}$ (单位:%),定义如下式

$$\frac{1}{f_{AC}} = T_{EP} + T_{EN} \quad (1)$$

$$R_{EN} = \frac{T_{EN}}{T_{EP} + T_{EN}} \times 100 \quad (2)$$

式中  $T_{EP}$  为 EP 极性输出时间; $T_{EN}$  为 EN 极性输出时间。从公式 1、式 2 可得

$$T_{EN} = \frac{R_{EN}}{100f_{AC}}, T_{EP} = \frac{100 - R_{EN}}{100f_{AC}} \quad (3)$$

由此可知,如果切换输出极性并控制每个极性的输出时间。就可以实现所期望的 EN 比率  $R_{EN}$  的交流焊接。

(1)熔敷量一致控制。

假定各极性输出的平均电流分别为  $I_{EP}$  和  $I_{EN}$ ,根据公式 3,EN 比率  $R_{EN}$  下的平均电流  $I_{Ave}$  为

$$I_{Ave} = \frac{I_{EP} \times T_{EP} + I_{EN} \times T_{EN}}{T_{EP} + T_{EN}} = I_{EP} + \frac{(I_{EN} - I_{EP})R_{EN}}{100} \quad (4)$$

即切换输出极性的同时,改变各极性相应的输出电流。平均输出电流对应着图 1 中箭头①线上不同的 EN 比率。

(2)电流一致控制。

假定各极性输出时的焊丝送丝速度分别为  $v_{f_{EP}}$  和  $v_{f_{EN}}$ ,EN 比率  $R_{EN}$  时的平均送丝速度  $v_{f_{Ave}}$  有

$$v_{f_{Ave}} = \frac{v_{f_{EP}} \times T_{EP} + v_{f_{EN}} \times T_{EN}}{T_{EP} + T_{EN}} = v_{f_{EP}} + \frac{(v_{f_{EN}} - v_{f_{EP}})R_{EN}}{100} \quad (5)$$

即切换输出极性的同时,改变各极性相应的送丝速度。焊丝熔化速度对应着图 1 中箭头②线上不同的 EN 比率。

### 1.2 搭载 AC-CBT 方法系统概要

搭载 AC-CBT 焊接机器人系统的外观如图 2 所示。



图 2 低热输入、低飞溅交流焊接机器人系统

采用针对焊接姿势变化提高低飞溅性能的 DL350 II 作为焊接电源,通过对各输出极性进行低飞溅控制,实现低飞溅 CO<sub>2</sub>/MAG 交流焊接。送丝系统采用搭载应答性能高的 AC 伺服焊枪,体积小、重量轻,使用世界领先的电缆内置机器人,通过辅助送丝机,实现完美送丝性能的同时,大幅度提高了焊丝回抽引弧控制的引弧性能。

### 1.3 AC-CBT 方法的效果

使用  $w(\text{Ar})80\%+w(\text{CO}_2)20\%$  的混合气体,φ 1.2 mm 的实心焊丝(相当 YGW12),平均电流 100 A,平均电压 15 V,焊接速度 50 cm/min,交流频率 3.0 Hz,EN

专题讨论——CO<sub>2</sub>焊接技术

比率 50% 的焊接条件, AC-CBT 进行恒流控制焊接, 1 s 的焊接电流、电压波形如图 3 所示。

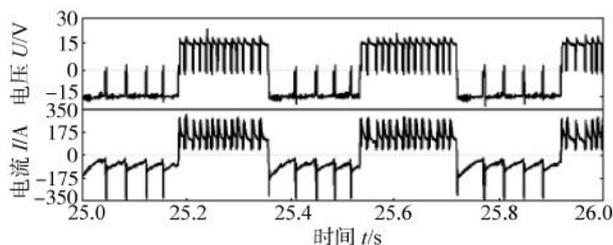


图 3 AC-CBT 方法的焊接电流、电弧电压波形

在 EN 极性输出中, 焊丝端部熔滴上的阴极斑点高速变动的现象可以从电压波形的微小波动体现出来, 所以电弧电压不表示熔滴下部和熔池的高度(表面观察的弧长)。因此只通过切换输出极性对电压进行反馈, 实现弧长稳定非常困难。另外, 通过恒流控制, 从而周期控制焊丝熔化速度, 实现弧长稳定更加困难。但是通过输出各极性最佳电弧特性和电压反馈, 尽管各极性的电弧时间完全不同, 也能够有规则地反复短路和燃弧, 实现非常稳定的交流焊接。

用高速摄像机(以下简称 HSV)在 6 000 fps 条件拍摄的电弧、电压波形测定时的熔滴过渡情况如图 4 所示。

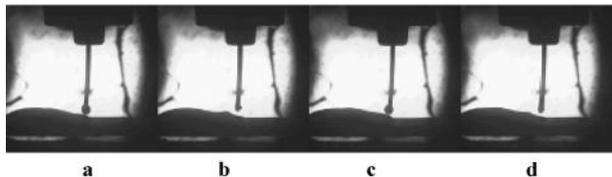


图 4 AC-CBT 工艺的熔滴过渡

图 4a 为图 3 中 25 s 时刻的 EN 极性电弧期间后期的熔滴状态。电弧时间长, 熔滴大, 显示了 EN 极性焊接的特征。图 4b 为图 4a 的状态一旦发生短路, 电弧在引弧瞬间熔滴的状态。和传统 EN 极性焊接一样, 由于发挥了抑制飞溅效果, 看不到飞溅的飞行痕迹。图 4c 为 25.2 s 时刻附近输出极性从 EN 切换为 EP 瞬间之前的 EN 极性电弧期间后期熔滴状态。由于控制 EN 极性最佳电弧特性和电压反馈结果, 熔滴与图 4a 几乎一样大。图 4d 为图 4c 后瞬间的电弧再引弧时熔滴状态。由于抑制飞溅控制效果发挥, 可以看到在极性切换后瞬间, 引弧时的飞溅也被抑制。

使用同样焊材, 平均电流 40 A, 焊接速度 30 cm/min, 交流频率 3.0 Hz, 板厚 0.8 mm, 间隙 1.5 mm

进行搭接焊接, 恒流控制, EN 比率分别 0%, 50%, 100% 变化时, 焊道外观和横断面的状态如图 5 所示。由图 5 可知, EN 比率越高, 熔深越浅, 上板越易搭桥。另外, EN 比率 0% 的焊道有焊透的现象, 相反 EN 比率 50% 发生明显改善。如此得知,  $\phi$  0.9 mm 以下的细焊丝焊接超薄板焊接, 可以用比较廉价的  $\phi$  1.2 mm 焊丝来替代, 改变 EN 比率可以简单地控制熔深。

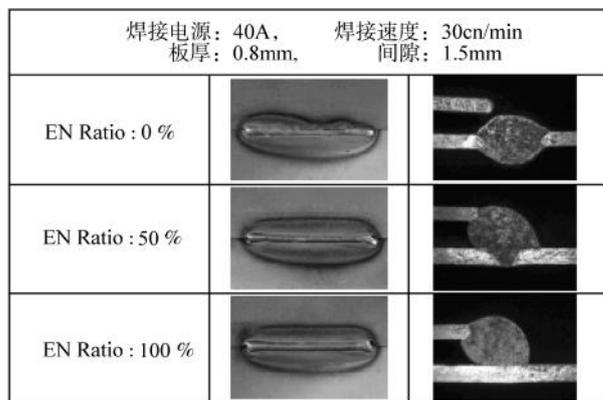


图 5 EN 比率对焊道形状的影响

使用同样焊材, 平均电流 80 A, 焊接速度 50 cm/min, 板厚 1.0 mm 的板上焊接, 交流频率分别为 1.0 Hz、3.0 Hz、5.0 Hz 的焊道外观变化情况如图 6 所示。交流频率相对焊接速度较低时, 熔深和焊道外观用目测就可以看出周期的波纹变化, 提高交流频率, 就可以使焊道成形得到改善, 3.0 Hz 以上的交流频率可以得到边缘整齐的焊道外观。即为了得到边缘良好的焊道成形, 使用 AC-CBT 方法焊接时, 不同的焊接速度需要设定不同的交流频率。

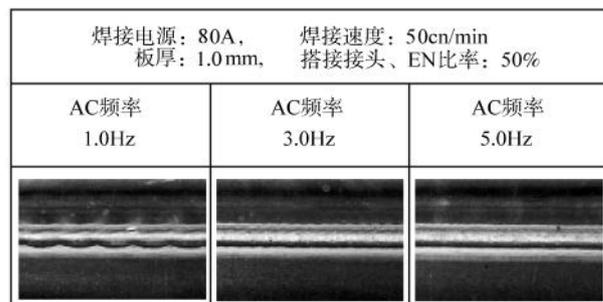


图 6 交流频率对焊道形状的影响

图 7 的条件与图 5 一样, 板厚 1.0 mm, 0.6 mm, 固定交流频率, 焊接速度以 10 cm/min 单位递增, 焊道边缘成形没有变差的极限速度的结果。从此结果得知, 极限速度和板厚无关, 几乎和交流频率成线性关系。即直线以下的速度, 边缘的成形好, 高于直线的速度(图中斜线部分), 焊道边缘的成形变差, 焊道

外观呈波浪形。

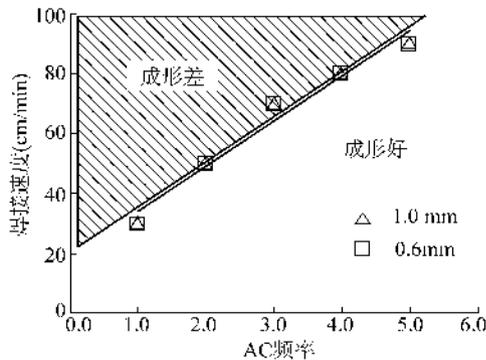


图 7 交流频率和最大焊接速度的关系

通过恒流控制的 AC-CBT 方法,每次极性切换时送丝速度都要变化,送丝速度的应答性就变得非常重要,采用传统的 DC 马达的送丝机,5.0 Hz 的频率完全在控制范围之内。此焊接机器人系统,由于采用了 AC 伺服电机,针对负载变化具有充分的送丝能力,可以保持稳定焊接性能的发挥。

要完全控制极性切换后瞬间引弧的飞溅非常困难,针对焊接速度来设定最低限的交流频率是非常重要的。例如,平均电流 100 A,平均电压 15.7 V,焊接速度 30 cm/min,交流频率 3.0 Hz,EN 比率 50% 的板上焊接的飞溅量,比较有无低飞溅控制:无低飞溅控制的 AC-CBT 方法,飞溅量为 0.35 g/min,而有低飞溅控制的 AC-CBT 方法,飞溅量为 0.06 g/min,约下降到 1/6 的飞溅减少效果,0.1 g/min 以下的飞溅量目视就像粉尘一样。

## 2 新开发 RS 控制法

### 2.1 使用 CBT 方法传统 RS 控制的问题

使用 AC 伺服反馈 RS 控制进行脉冲焊接很早就已经实现,其高引弧性能有口皆碑<sup>⑧</sup>。在此采用机器人手臂的动作进行 RS 控制,来取代焊丝回抽的方法,从而确保了无脉冲控制的高引弧性能<sup>⑨</sup>。可是用 CBT 方法与 RS 控制组合,电弧起弧后瞬间容易发生飞溅,所以必须解决这个问题。

使用  $w(\text{Ar})80\%+w(\text{CO}_2)20\%$  的混合气体,φ 1.2 mm 的实芯焊丝(相当 YGW12),用 CBT 方法,RS 控制引弧,用 HSV 进行观察的结果如图 8 所示。

图 8a 为电弧引弧后的初次短路,短路电流通电的同时,熔滴向母材过渡的过程。通过表面张力和重力,熔滴向母材过渡,没有进一步的熔滴过渡。图 8b 为短路电流越高,没有完全过渡的熔滴下部由于电磁力的作用而缩细。图 8c 为再度引弧,熔

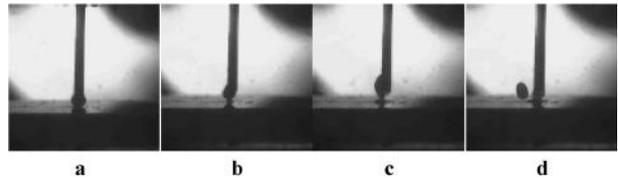


图 8 传统 RS 控制发生飞溅解析

滴没有完全过渡。图 8d 为再引弧失败,没有完全过渡的大粒熔滴,电弧发生时造成的大颗粒飞溅。由此得知,传统 RS 控制即使可以无飞溅引弧,熔滴没有完全向熔池过渡,再次引弧预测失败,容易发生大粒的飞溅。

### 2.2 新开发 RS 控制的效果

为了解决前项问题,开发了从引弧后瞬间控制对母材的热输入,在初次短路之前,使熔滴充分向母材过渡的程序控制。为了验证其效果,有意使焊接结束时焊丝尖端的小球直径增大,促成初次短路熔滴向母材过渡困难的状态,观察了 RS 控制引弧时的熔滴过渡,其结果如图 9 所示。

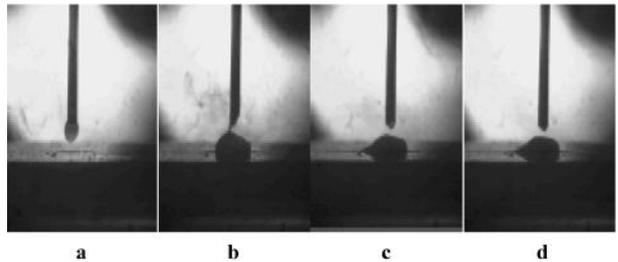


图 9 RS 控制引弧时的熔滴过渡

图 9a 表示 RS 控制引弧后瞬间的状态。和传统方式一样,呈现无飞溅引弧的状态。图 9b 为初次短路的样子。由于焊接结束时的熔滴在大颗粒的状态下进行引弧,虽然焊丝尖端的熔滴大,由于熔池完全成形,熔滴没有残留地过渡到母材。图 9b~图 9d 为之后电弧在电弧发生后瞬间的状态,都成功地预测了再引弧,抑制了飞溅的发生。对引弧性能极差、母材容易附着飞溅的不锈钢 MIG 焊接,效果会更加明显。

使用  $w(\text{Ar})98\%+w(\text{O}_2)2\%$  气体,φ 1.0 mm 的实芯焊丝(相当于 SUS 308),母材 SUS304,各设定电流的焊接速度 100 cm/min,焊接长度 30 mm,焊接持续时间 1 min,使用新开发的 RS 控制和传统引弧控制对飞溅发生量进行比较的结果如图 10 所示。为了使引弧条件严格,在两次焊接之间,设定了焊丝冷却时间。在飞溅量最多的 150 A 进行比较,传统的引弧控制,正常焊接时飞溅量在

专题讨论——CO<sub>2</sub> 焊接技术

Page 13 0.1 g/min 以上<sup>[6]</sup>,连续引弧焊接时的飞溅量增加约为 0.8 g/min。RS 控制和正常焊接时一样,飞溅量可以抑制到 0.1 g/min 以下,从此得知,引弧后瞬间到正常焊接时都发挥了抑制飞溅的效果。

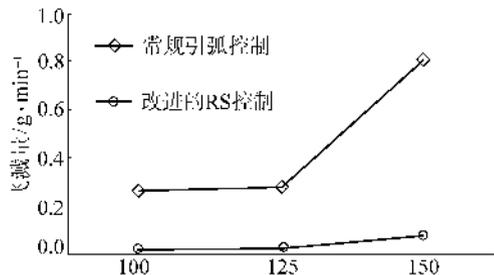


图 10 不锈钢 MIG 焊接时飞溅发生量的比较

使用 AC 伺服反馈送丝系统对 RS 控制进行了改良,在此得到的技术对机器人的 RS 控制也起作用,可以得到同样的效果。

### 3 结论

本文对最适合超薄板焊接的低热输入低飞溅 CO<sub>2</sub>/MAG 交流焊接系统进行了介绍。此技术在车体底部的焊接得到了应用,在今后也将会应用于车

体本身的电弧焊接。

### 参考文献:

- [1] 清原,岡田,山本.有关短路电弧焊接熔滴过渡稳定性和新控制方法[A].焊接电弧物理研究委员会资料.73-205 (1973).
- [2] 三田.CO<sub>2</sub> 电弧焊接波形控制法的探讨[D].焊接学会论文集,1988.
- [3] 王,井原,印南.新 CO<sub>2</sub> 焊接法 PC 工艺法的开发[J].焊接技术,1996,44(10):
- [4] Ogasawara T, Maruyama T, Saito T, *et al.* A Power Source of Gas Shielded Arc Welding with New Current Waveforms[J]. Welding Journal, 1987, 66(3):
- [5] Stava E K. A new low spatter arc welding machine[J]. Welding Journal, 1993, 72:
- [6] 上山,惠良,井手,等.CBT(Controlled Bridge Transfer)方法对低热输入低飞溅 CO<sub>2</sub>/MAG 焊接系统的开发[J].焊接技术,2006,
- [7] 三田,品田,坂本,等.薄板用交流 MAG 焊接电源的开发和其应用[D].第 166 次焊接法研究委员会资料,SW-2638-99(1999).
- [8] 西坂,上園,上山.用 GMA 焊接的抽丝起弧法的开发[D].焊接学会全国大会演讲概要,2002.