

高熔敷率低热输入的Tri-Arc双丝电弧焊接方法

哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点试验室　耿正
深圳市瑞凌实业股份有限公司　魏占静　韩雪飞　汪清华　王巍　邱光

【摘要】本项研究基于一种全新的双丝电弧焊接方法，该方法在两根焊丝与焊接工件之间建立了三个电弧，即Tri-Arc。不仅每根焊丝与焊接工件之间分别建立了两个焊接电弧，而且还在两根焊丝之间创立第三电弧（称“*M*电弧”）。该技术从根本上解决提高焊丝熔敷率与降低工件热输入之间的矛盾。试验结果表明，在等速送丝条件下，通过调整M电弧电流可以改变流入焊接工件的电流，其结果是可以控制工件的热输入。

1. 概述

在熔化极电弧焊中提高焊接效率的关键是提高焊丝熔敷率，而焊丝的熔敷率主要是由焊接电流大小所决定的。由于单丝电弧焊的电流限制了熔敷率，因此一些双丝电弧焊方法成为获得更高焊丝熔敷率的选择。然而无论是普通单丝电弧焊，还是高效双丝电弧焊，对于任一路的焊丝-电弧-工件之间都是简单的串联关系，所以流过焊丝的总电流必然等于流过焊接工件的总电流。因此在常规电弧焊接过程中，在提高焊丝熔敷率的同时也必然会导致对焊接工件热输入的增加，而热输入的增加会导致焊缝金属性能下降，焊接变形增加等一系列问题，所以在实际焊接过程中又必须控制焊接热输入。这样一来，高焊丝熔敷率与降低焊接热输入在常规电弧焊接方法成为一对无法解决的矛盾。

采用旁路电弧分流部分焊丝电流，使得流经焊接工件的电流可以低于流经焊丝的电流，这无疑是一种可以破解上述矛盾的理想方法。然而对于这种旁路电弧焊接方法，当旁路电极也为熔化极时，则焊接稳定性存在问题。这是因为在旁路电弧控制过程中：如果采用恒流方式，理论上可以稳定旁路电弧电流，但是旁路电弧的弧长难以稳定，而且要求送丝速度与电流精确匹配；如果采用恒压方式，理论上旁路电弧弧长可以稳定，但是电流对两焊丝的交点位置十分敏感，结果是旁路电弧电流难以稳定。因此对于旁路电弧控制，无论采用哪种控制方式，都难以解决稳定性问题，这也正是该方法存在原理上的欠缺。由于旁路电弧难以稳定，便会影响到主焊接电弧的稳定性，所以目前这种方法在实际中还鲜有应用。

针对上述问题，为了实现高焊丝熔敷率，低焊接热输入，本项研究采用一种可以分别调节焊丝电流和工件电流的三电弧双丝电弧焊接方法。

2. Tri-Arc双丝电弧焊接的基本原理

常规的电弧焊接方法，包括双丝和多丝焊接方法，电弧数量总是等于焊丝数量，而本项研究提出一种在两根焊丝与焊接工件之间建立三个电弧的新型双丝焊接方法，如图1所示。在图1a中，VPPS为可变极性电源，PPS1和PPS2为两直流脉冲电源，通过控制上述三电源的极性和脉冲相位关系，可以在焊丝E_1与焊接工件之间建立第一电弧A_1，在E_2与焊接工件之间建立第二电弧A_2，在焊丝E_1与E_2之间建立第三电弧M。M电弧又称为调制电弧，Tri-Arc双丝电弧焊的新特性主要是由M电弧的作用决定的。为了说明它的基本工作原

理，需要从静态和动态两个角度去分析。首先，从静态分析的角度图1a可分解为图1b和图c的两个过程：

（1）过程一：图1b中PPS1恒压输出，E_1极性为DCEP，电弧A_1建立在E_1与焊接工件之间，流过电弧A_1的电流为I_1，VPPS恒流输出，电极E_2极性为DCEN，M电弧建立在两根焊丝E_1与E_2之间，流过M电弧的电流为I_3。此时，PPS2为零电流输出（断开），因此电弧A_2熄灭。需要特别说明的是，此时流经焊丝E_1的电流并不等于流过电弧A_1的电流，而是流过电弧A_1与M的电流的和，流经焊丝E_2的电流为I_3，流经焊接工件的电流$I_4=I_1$。

（2）过程二：图1c中PPS2恒压输出，E_2极性为DCEP，电弧A_2建立在E_2与焊接工件之间，流过电弧A_2的电流为I_2，VPPS恒流输出，电极E1极性为DCEN，电弧M建立在两根焊丝E_2与E_1之间，流过M电弧的电流为I_3。此时，PPS1为零电流输出（断开），因此电弧A_1熄灭。需要特别说明的是，此时流经焊丝E_2的电流并不等于流过电弧A_2的电流，而是流过电弧A_2与M的电流的和，流经焊丝E_1的电流为I_3，流经焊接工件的电流$I_4=I_2$。

通过上述过程分解，Tri-Arc双丝电弧焊基本工作过程可以看作是两个相互对称的旁路电弧焊接过程的组合，这样组合自然具有旁路电弧焊接方法原有的高熔敷率、降低焊接热输入的特点，而且该组合还解决了决旁路电弧方法原有的稳定性问题。为了分析三电弧双丝方法的稳定性，则需要将图1b与图1c所示的两个静态的分立过程以动态的方式连续起来，建立如图2所示的电流波形。在图2中，在t_0~t_1期间，对应于图1b所示；在t_1~t_2期间，对应于图1c，以此类推两种状态周期性地交替进行。

在图2中，如果单独看E_1或E_2中的任意一根焊丝的电流波形IE_1或IE_2都相当于交流脉冲MIG焊。对于交流脉冲MIG焊可以分为DCEP与DCEN两个期间进行了分析。在E_1的DCEP期间（t_0~t_1），PPS1为恒压输出，相当于脉冲峰值，因此具有弧长自身调节作用，同时VPPS的P_1为正，P_2为负，VPPS恒流输出，电流方向与PPS1一致，均为从电极E_1流出；E_1的DCEN期间（t_1~t_2），PPS1输出电流为零，VPPS的P_1为负，P_2为正，此时只有VPPS恒流供电，相当于脉冲维弧电流，但是电流方向是流入电极E_1的。由于E_2与E_1的波形相同，只是相位相差180°。

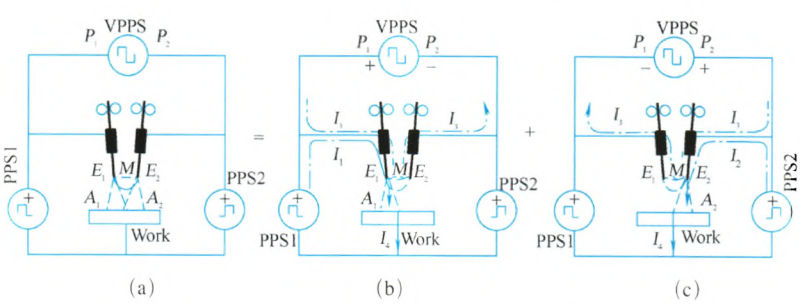


图1 Tri-Arc双丝电弧焊工作过程分解

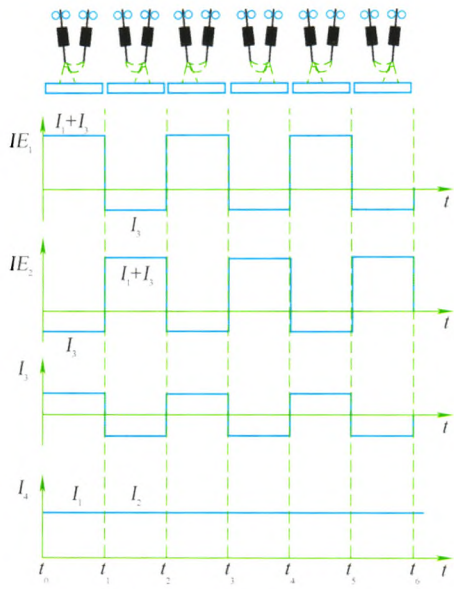


图2 Tri-Arc双丝电弧焊接电流波形示意

即E_2的DCEN对应于E_1的DCEP，E_2的DCEP对应于E_1的DCEN，因此，无需重复上述分析。通过上述波形分析可知，在Tri-Arc双丝电弧焊接中，电极E_1和E_2都相当于工作在U-I脉冲方式，因此电弧A_1，A_2的弧长都会被自动调节，而只要A_1，A_2的弧长稳定了，M电弧自然也就稳定了，所以三电弧双丝电弧焊接系统也必然是稳定的。

Tri-Arc双丝在局部静态上看等同于旁路电弧，但是在连续动态上更接近Tandem方式，而且Tri-Arc双丝焊枪可以与Tandem兼容。这样的焊枪结构紧凑，更便于焊接机器人系统使用。

3. 试验条件与方法

试验方法采用保持相同熔敷率，通过调节M电弧的电流改变焊接工件的热输入。因此焊接试验条件采用在相同送丝速度、脉冲电压、脉冲频率下比较VPPS的输出电流I_3，对焊接过程的影响，即降低焊接热输入的作用，具体试验条件如附表所示。

焊接试验参数

	条件1	条件2
VPPS（I_3）/A	20	150
PPS1（U_1）/V	42	42
PPS2（U_2）/V	42	42
送丝速度/m·min^{-1}	9	9
焊接速度/mm·min^{-1}	500	500
脉冲频率/Hz	50	50
峰值时间/ms	10	10
焊丝干伸长/mm	25	25

焊接试板材料为低碳钢，焊接工件厚度10mm，无间隙堆焊。焊丝材料为H08Mn2Si，保护气体92%Ar+8%CO_2。

焊接电源采用深圳瑞凌制造的Tri-Arc™ I 型Tri-Arc双丝焊接系统，如图3所示。该系统具有多特性脉冲输出功能，内部三电源同步协调控制，满足图1Tri-Arc双丝焊接工作原理要求。

焊枪采用深圳瑞凌的HIT—800DE双丝焊枪，焊枪为水冷结构（见图4）。两根焊丝的夹角为18°，两根焊丝从导电嘴伸出后在（35±5）mm处相交。

4. 试验结果与分析

（1）*M*电弧电流对焊接电流波形的影响　图5为实测的焊接电流波形，其中L-WIRE为焊丝E_1电流，R-WIRE为焊丝E_2电流，WORK为工件电流。由图5 中可见，实测电流波形具有与图2中原理分析波形一致的相位和极性变化关系；进一步观察波形细节可以发现，在电流的正半波有一定的波动，而在电流的负半波则很稳定。这是因为，在DCEP期间有恒压电源的作用，而在实际焊接中弧长总会有所波动，所以电流会随之波动，这也正是说明具有弧长自身调节作用；而在DCEN期间，只有恒流电源的作用，因此即使两焊丝之间的距离会有所波动，但是*M*电弧的电流是相对稳定的。

从图5电流波形上可以看到：*M*电弧电流上升，工件电流下降，反之亦然。注意此时的送丝速度并没有变化，所以根据熔化极电弧焊的基本工作原理：当送丝速度一定，且干伸长恒定时，流经焊丝的电流也应该是恒定的。这点可以从图2的电流合成关系及图5的实际电流参数得到验证。但是*M*电流会影响到流入焊接工件的电流：①当*M*电弧电流为20A时，工件电流为396A。②当*M*电弧电流为150A时，工件电流降低为270A。

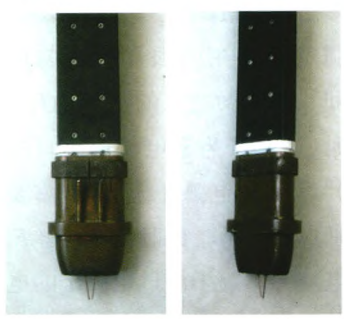
由此可见，在不改变送丝速度的条件下，通过增加建立在两根焊丝之间的*M*电弧电流I_3可以降低流入焊接工件的电流。

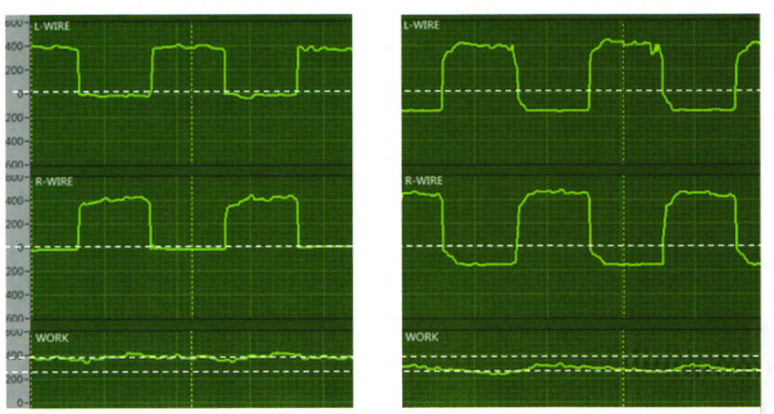
（2）*M*电弧电流对降低焊接热输入的作用　比较附表中的试验条件1与试验条件2，两者唯一的差别就在于*M*电弧的供电电源VPPS的输出电流I_3设置不同。因此对比图5a与图5b的电流波形可知：在送丝速度相同，即焊丝熔敷率相同的条件下，随着*M*电弧电流I_3的增加，流入焊接工件的电流I_4下降，这也就是*M*电弧的调制作用。当*M*电弧电流I_3由20A提高到150A时，流入焊接工件的电流I_4由396A降低到270A。而流入焊接工件电流的降低，意味着焊接热输入的降低，这点可以进一步从图6的焊缝截面图中得到验证。对比图6a与图6b可以看到，当电流I_3由20A提高到150A时，焊缝熔深显著降低。

当增加*M*电流，降低熔深的同时，焊接工件变形量也显著降低，如图7所示。当I_3=20A时，焊接热输入较大，焊接工件有严



图3　Tri-Arc™ I 型电源系统


图4　HIT—800双丝焊枪



(a)　(b)

图5　*M*电弧电流对电流波形的影响

重的翘曲，在焊缝结束端甚至出现了烧穿；而当I_3=150A时，焊缝基本平整，无明显翘曲。

（3）Tri-Arc双丝焊与Tandem双丝焊的比较　Tandem双丝焊是目前公认的最理想的高效电弧焊接方法之一，与其他双丝或多丝电弧焊接方法相比，Tandem双丝在高焊丝熔敷率的同时具有相对较低的焊接热输入。Tandem双丝之所以能在一定程度上降低焊接热输入，是因为两根靠的很近的焊丝之间有相互加热作用，即有一种等效的热丝作用。但是由于Tandem双丝没有脱离传统电弧焊接方法的焊丝电流全部流入焊接工件的基本定式，因此与Tri-Arc双丝焊相比，Tandem双丝焊的这种降低焊接热输入的作用几乎可以忽略不计。

值得指出的是：Tri-Arc双丝焊不仅在焊枪上与Tandem双丝焊相兼容，而且事实上，在Tri-Arc双丝焊中，当*M*电弧电流趋于零时，则可认为Tri-Arc双丝焊蜕变为Tandem双丝焊，即：Tri-Arc双丝焊在焊接原理上向下兼容Tandem双丝焊，或者也可以说：Tandem双丝焊是Tri-Arc双丝焊的一个特例，即*M*电弧电流为零时的特殊状态。因此Tri-Arc双丝焊可以作为一种高效电弧焊接方法覆盖Tandem双丝焊的所有应用范围，而且在降低焊接热输入方面更具有显著优势。例如，从焊接变形方面看：在相等的焊接效率下，Tandem双丝焊的焊接变形量相当于图7中I_3=20A的情况（实际上可能还会略高一点），而使用Tri-Arc双丝焊通过提高*M*电弧电流，可有效降低焊接热输入，通过图7可以看到，当I_3=150A时的焊接变形量较I_3=20A时有显著下降。即可以认为：在相同焊接效率下，使用Tri-Arc双丝焊方法较Tandem双丝焊可有效降低因焊接热输入导致的焊接变形量。

（4）Tri-Arc双丝焊方法的*M*电弧作用分析　在传统的电弧焊接中，熔深是正比于焊接电流的，但是在Tri-Arc双丝焊接方法中，由于M电弧的接入，焊接电流被分为焊丝电流与工件电流，因此工件电流是对焊接热输入起主要作用的焊接参数，而焊丝电流主要对应与焊丝的熔敷率。*M*电弧相当于在两根焊丝之间形成了一个电流分流回路，从而在保证焊丝电流不变，即保证焊丝的熔敷速度与送丝速度平衡的前提下降低了流入焊接工件的电流。当然熔化的焊丝所带的热量及*M*电弧也会对熔池产生一定加热作用，但是这部分能量要比直接流入工件的电弧电流的作用降低很多，这点通过上述焊接试验中的焊缝熔深与工件变形结果可以得到验证。因此通过增加*M*电弧的电流，可以有效地降低焊接工件的热输入。



(a) 试验条件1：I_3=20A　　(b) 试验条件2：I_3=150A

图6　*M*电弧电流对降低焊缝熔深的作用

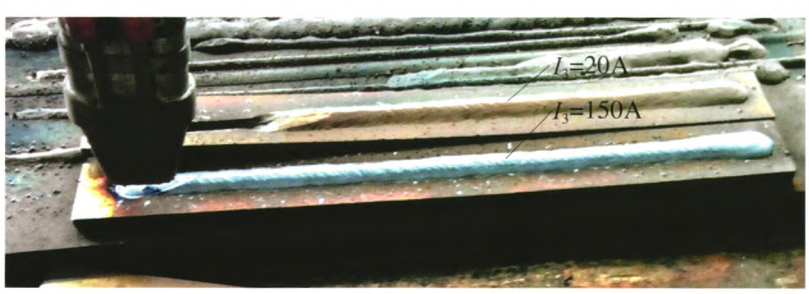


图7　*M*电流对降低焊接工件变形的作用

上述讨论的是等速送丝，实际上如果在增加送丝速度的同时提高*M*电弧的电流不仅可以保持工件电流不变，而且也可以使工件电流下降。因此Tri-Arc双丝焊接在*M*电弧的作用下可以实现在提高焊丝熔敷率的同时降低焊接工件的热输入。这对于大厚度板的高效焊接、薄板的高速焊接，以及堆焊和电弧钎焊等要求高熔敷率、低热输入的焊接应用都具有重要的应用价值。

5. 结语

由于在Tri-Arc双丝焊接过程中引入了第三电弧*M*，使得焊丝电流与工件电流相对独立可控，继而可以将焊接电流定义为：焊丝电流与工件电流两个参数。

在Tri-Arc双丝焊接试验中，*M*电弧电流可以在大范围内调节，且焊接过程稳定，弧长具有良好的自身调节作用。

（下转第42页）

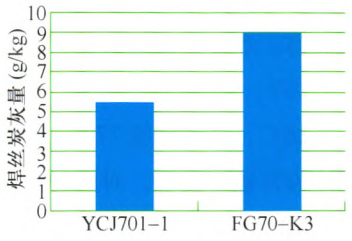


图2 两种焊丝发尘量对比结果

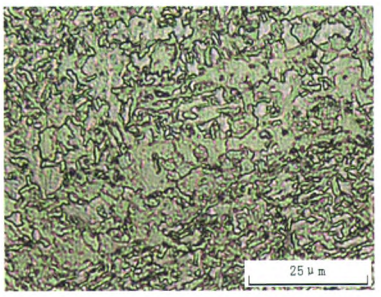


图3 焊接接头金相组织

表7 短路过渡特征参数

焊丝牌号	短路频率 /次·s^{-1}	平均短路时间 /ms
YCJ701—1	37	2.77
FG70—K3	45	3.52

织中以针状铁素体为主，含有少量的贝氏体、珠光体。大量针状铁素体保证了焊接接头具有较好的冲击韧性。

（5）扩散氢含量 按照GB／T3965—1995要求，用水银法检测熔敷金属扩散氢含量。试验条件同焊丝焊接烟尘发尘量对比试验条件。扩散氢结果如表6所示。由表8可知，扩散氢含量均值6.85mL/100g，检测结果达到设计要求。

4. 结语

(1)所研制YCJ701—1药芯焊丝工艺性优良，焊接电弧稳定、低飞溅、成形美观、全位置焊接适应性强。

(2)焊丝采用富Ar气体保护焊接时，熔敷金属具有良好的综合力学性能，可以保证-40℃下低温冲击韧性值大于47J。该焊丝与Q590CF钢板具有较好匹配性。

(3)该焊丝发尘量较少，采用水银法测量扩散氢含量结果6.85mL/100g，满足设计要求。

表8 扩散氢含量

次数	扩散氢含量mL／100g
1	6.96
2	6.91
3	6.68
均值	6.85

参考文献：

[1] 唐伯钢，尹士科，王玉荣. 低碳钢与低合金高强度钢焊接材料[M]. 北京：机械工业出版社，1987.

[2] 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.

MW 20141008

（上接第39页）

调节*M*电弧的电流，可在送丝速度及其他焊接条件不变的条件下改变流入焊接工件的电流。

试验表明，流入焊接工件的电弧电流的直接加热作用远高于*M*电弧的间接加热作用，因此通过增加*M*电弧电流来降低流入工件的电流可以有效地降低焊接工件的热输入。

Tri-Arc双丝焊接实现焊丝熔敷率与焊接热输入相对独立控制，在*M*电弧作用下可以实现高焊丝熔敷率低焊接工件热输入。

参考文献：

[1] 殷树言，徐鲁宁，丁京柱. 熔化极气体保护焊的高效化研究[J]. 焊接技术,2000(4):5-7.

[2] 班玉兵.高效MIG/MAG焊中焊接材料熔化效率的影响因素[J].机械工人,2007(7):35-37.

[3]李星林，黄石生，吴开源，等. 双丝脉冲MIG/MAG焊的现状和发展方向[J]. 电焊机，2007,37(10):11-13.

[4] 吉俊文. Tandem 双丝焊接电源的系统设计与调试[D]. 北京: 北京工业大学硕士学位论文，2008.

[5] 魏占静. Tandem高速、高效MIG/MAG双丝焊技术[J]. 机械工人，2002（12）:32-33.

[6]Ken Michie, Stephen Blackman. Twin-Wire GMAW: Process Characteristics and Applications [J]. Welding Journal. 1999.15:31-34.

[7] 武传松，张明贤，李克海，等.DE-GMAW高速电弧焊工艺机理的研究[J].金属学报，2007,43(6)663-667.

[8]西村弘，宫原野夫. 自动ア—ク熔接法：JP,52091752 A [P]. 1977-08-02.

[9]Richard M. Hutchison, Joseph K. Fink. MIG-MIG Welding Process. US 20100059485 A1 [P]. 2010-03-11.

[10]耿正. 双丝动态三电弧焊接方法. CN 102069265 B [P]. 2012-08-22.

作者简介：耿正，博士，教授，主要从事电弧焊接方法与设备方面的科研和教学工作。魏占静，高级工程师，主要从事高效电弧焊接方法的研究与工程实施。

MW 20141107