

CO₂气体保护焊短路过渡过程的闭环实时控制

李桓, 李俊岳, 杨立军, 张宝红*

(天津大学 材料科学与工程学院 天津 300072)

摘要: 为了减少 CO₂气体保护短路过渡焊时的飞溅, 本文提出了短路过渡过程的闭环实时控制思想并进行了试验研究。在熔滴与熔池发生短路及液体小桥爆断这两个最容易产生飞溅的时刻, 利用大功率电子开关元件切换焊接回路外串电阻的方法及时降低焊接回路中的电流。在前一时刻维持较低电流至熔滴与熔池充分接触, 在后一时刻维持较低电流至熔滴过渡完毕。该方法能有效地抑制由瞬时短路造成的大颗粒飞溅和由电爆炸产生的细颗粒飞溅, 实现了 CO₂气体保护焊短路过渡过程的闭环实时控制。

关键词: CO₂短路过渡; 焊接飞溅; 实时控制

中图分类号: TG403 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2001)01—27—04



李桓

0 序 言

以细直径实心焊丝、纯 CO₂气体保护、短弧长、低电压、小电流为主要特征的 CO₂气体保护短路过渡焊, 因其高效率、低成本、适用范围广、便于实现半自动和自动化焊接、全位置焊接适应性好等诸多优点, 得到了普遍重视和广泛采用。

然而, 由于 CO₂气体的性质使得该焊接方法存在两个明显的缺点, 即焊接飞溅大和焊缝成形差。因而限制了 CO₂焊的进一步推广应用。解决上述问题有多种方法, 其中电控方法能够保留短路过渡及 CO₂焊接低成本的优点。随着焊接电弧物理理论的不断丰富和完善、对短路过渡过程认识的不断深入以及现代电力电子技术和计算机技术的不断发展, 这种控制方法表现出越来越明显的优势^[1~7]。

电控方法要解决两个问题, 即电弧及熔滴状态的实时检测和实时控制。前者已有专文论述^[8], 本文主要涉及实时控制的内容。

1 实时控制方案的提出

CO₂气体保护焊的短路过渡过程是一个受多种因素影响的随机现象, 因此必须对短路过渡过程进

行实时控制才能收到理想的控制效果。试验证明, 以预置参数为主要技术特征的波形控制方法应用于 CO₂焊短路过渡过程时由于没能很好地解决电弧、熔滴及液体小桥的状态判断问题, 因此影响到电流、电压波形控制的精确程度。

通过对 CO₂焊短路过渡过程的理解和总结前人波形控制法的利弊, 主要针对 CO₂焊时因瞬时短路而形成的大颗粒飞溅和因电爆炸而形成的细颗粒飞溅并兼顾焊缝成形, 本文制定了如图 1 所示的控制方案。其控制过程如下。

(1) 当检测到熔滴与熔池发生短路后, 启动控制系统, 将降流电阻串接至焊接回路中, 强迫熔滴在较低电流水平下与熔池充分接触, 以杜绝瞬时短路现象的发生。

(2) 电流在较低水平维持 300 μs 后, 取消降流措施, 使液体小桥中流过的电流按指数规律增长, 以保证足够的电磁压缩作用。时间 300 μs 是根据对 CO₂焊短路过渡过程与电参数关系的普查及大量试验后确定的。

(3) 当缩颈检测系统检测到处于焊丝和熔池之间的液体小桥被电磁收缩作用压缩至产生缩颈后, 再次启动控制系统在电路中串入上述降流电阻, 强迫短路电流迅速降低, 使液体小桥在较低电流水平下柔顺地被主要来自于熔池的表面张力所拉断, 以杜绝电爆炸现象的发生。

(4) 当检测到焊接电压的上升沿超过 15 V 时认为液体金属过渡完毕, 此时应及时关闭控制系统让电弧迅速复燃, 以保证焊丝的正常熔化和对工件

收稿日期: 2000—04—21

基金项目: 国家教委博士学科点专项基金资助项目(9405609); 天津市自然科学基金资助项目(993602911)

* 参加本研究工作的还有邓黎丽、李国华

较宽范围的有效加热，并等待下一个过渡周期的到来。如此周而复始直至焊接过程结束。

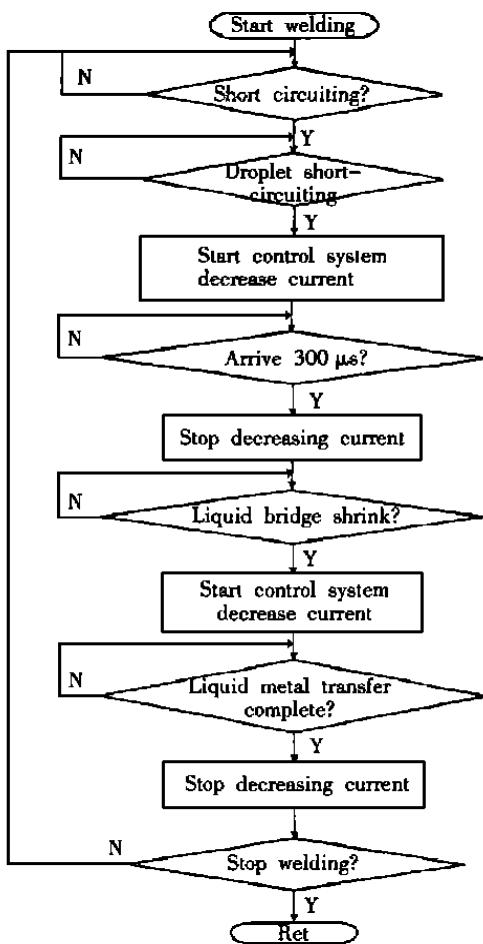


图 1 CO_2 焊短路过渡过程的闭环实时控制方案

Fig. 1 Plan of closed-loop real-time controlling in short-circuiting transfer of CO_2 welding

上述控制方案的第一个特点是采用了定状态和定时间的混合控制法。在一个过渡周期中各启动、关闭控制系统两次。除熔滴正常短路后控制系统的关闭采用定时($300 \mu\text{s}$)控制外，其余的两次启动和一次关闭均采用定状态控制。这是因为无论是熔滴的瞬时短路还是正常短路， $300 \mu\text{s}$ 的时间足以使液体熔滴与熔池混合到一起，且尽管焊接工艺参数可能在较大范围内变化，但都对定时时间的设置表现出不甚敏感，故此时采用了定时控制的措施，但其余三次控制系统的动作都必须依据熔滴或短路液桥的瞬时状态。

上述控制方案的第二个特点是将短路电流的有害作用与有利作用区分开来。在短路瞬间，由于短路电流的作用有时会将熔滴抛出焊接区，形成所谓的瞬时短路现象；在短路后期，由于短路电流的作用会造成电爆炸的现象。上述两种现象的出现均可归结为短路电流的有害作用。只要在上述两个时刻将短路电流降至某一合适值并维持一段时间即可消除

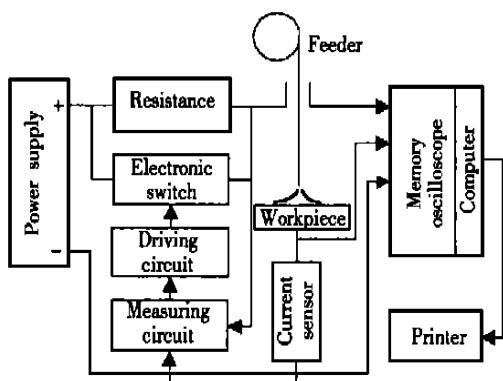
短路电流的有害作用。而在上述两时刻之间，短路电流对液体小桥的压缩是有利的，应让短路电流以一个合适的增长率为 di/dt 迅速升至短路峰值电流 I_{\max} 以保证缩颈的形成。

尽管 CO_2 气体保护焊短路过渡过程中存在着多种形式的飞溅，但实践证明最主要的还是由于短路初期的瞬时短路以及缩颈形成后的电爆炸引起的飞溅。本控制方案的基本思想是把对电弧平均参数控制的任务交给传统的具有简单恒压输出特性的弧焊电源及具有恒速特性的送丝机构来完成。由前者控制电弧的平均电压，由后者控制电弧的平均电流。把对电弧瞬态参数控制的任务交给本文提出的控制系统。再者，本控制方案对弧焊电源的性能特别是其动态品质有一定的要求，主要是焊机的时间常数要小。根据试验结果，电感以不超过 $100 \mu\text{H}$ 为宜。

2 实时控制系统的建立

包括抽头式、自调电感式、磁放大式及可控硅式等在内的 CO_2 焊接电源都只具有简单的恒压输出特性。上述电源在 CO_2 焊接电源中所占的比例最大。这类焊接电源制造容易，成本较低，在一般场合均可满足使用要求，然而这种电源只能控制电弧的平均长度，在对焊接质量尤其是焊接飞溅的指标要求较高的场合，其应用范围受到了某种限制。本文建立的 CO_2 焊短路过渡过程闭环实时控制系统的思路在于以上述几种传统的 CO_2 焊接电源为基础附加相应的检测和控制装置，使之具有消除瞬时短路和电爆炸的功能，减少焊接时的飞溅并兼顾焊缝成形，扩大其应用领域并具有较高的技术含量和附加值。

该系统由传统的只具有简单恒压输出特性的弧焊电源(NBC—200型)、具有恒速特性的送丝机构、 CO_2 气体保护焊短路过渡过程中液体熔滴及短路液桥状态检测系统、外接降流电阻、大容量电子开关及其相应的驱动电路等组成。降流电阻的参数为 $600 \text{ W} - 1 \Omega$ ，系统组成如图2所示。具体控制过程如下：将焊枪与工件间的电压信号反馈至检测电路，燃弧阶段电子开关处于导通状态；当焊丝端部的熔滴与熔池相接触时，控制电路发出信号，驱动电路动作断开电子开关，使外接电阻切入焊接主回路，此时回路中电阻增加，回路电流下降。在低电流下，熔滴与熔池充分接触，延时一段时间后，将电阻从主回路中切换出来，回路中的电流自然上升；当检测到缩颈形成后，同样进行上述过程，通过电压比较适时将电阻切换出来，随后进入正常燃弧阶段。

图 2 CO₂焊短路过渡闭环实时控制系统的组成Fig. 2 Component of closed-loop real-time control system in short-circuiting transfer of CO₂ welding

3 试验验证

3.1 波形测试结果

控制条件下 CO₂焊短路过渡过程中电弧电压、焊接电流、回路电阻及电弧功率的波形如图 3 所示。当焊接电压由燃弧状态转变为短路状态时对应焊接电流则降低至 50 A 左右, 电弧功率降低至 500 W 左右并维持近 300 μs, 熔滴在低能量状态下容易与熔池融合到一起, 显然对瞬时短路的飞溅有极好的抑制作用。

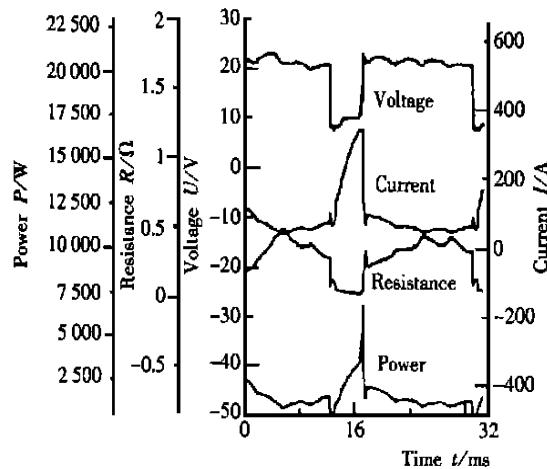


图 3 控制条件下的波形

Fig. 3 Waveform under controlled condition

在缩颈产生以后(此时对应焊接电压由低到高突变的拐点及焊接电流的峰值位置), 由于控制系统的作用, 短路电流在 160 μs 内由峰值降至 100 A 以下。此时电弧功率亦降至整个过渡周期内最大值的 40% 以下, 因此对小桥爆断过程有明显的控制作用。

在控制条件下, 稳定焊接过程的电压比同样送

丝条件下无控制时要高出 2 V 左右。出现这一现象的原因是, 无控制条件, 熔滴一旦与熔池接触, 电流即刻自然上升, 且小桥断裂后, 电流并非迅速降至燃弧水平, 而是有一个自然下降过程, 通过对计算机采集的电压、电流信号进行积分运算, 发现即便是排除正常的燃弧电流后, 电流下降阶段所产生的热量也高达整个燃弧阶段所产生的热量的 30% 以上; 而在控制条件下, 在上述两个时刻存在两次降流动作, 小桥断裂后燃弧电流不存在无控制条件下所出现的自然下降过程, 显而易见熔敷金属的加热受到了影响, 故需要适当提高电压以弥补两次降流带来的影响, 同时焊接电压的提高也使得焊缝成形有所改善。

3.2 熔滴过渡特征

在本控制条件下, 因小桥断裂之前已将电流降至 100 A 以下, 小桥金属无从积累爆炸所需的过剩能量, 其主要是受表面张力作用, 在低能量状态下断裂而过渡到熔池之中, 所以其断裂时不会出现爆断过程中所出现的金属雾团, 同时由于没有小桥爆炸所产生的作用力影响, 焊丝端头金属和熔池金属的回复是在表面张力作用下完成的, 故在小桥刚一断裂之际, 背景光由于没有了小桥爆断所形成的金属雾团遮蔽, 顺利地通过焊丝与工件之间的空间, 从高速摄影照片上可以清楚地看到小桥断裂后熔池和焊丝端头熔化金属尚未完全回复时的情况(图 4)。



图 4 控制条件下焊接熔滴过渡高速摄影(3 600 帧/s)

Fig. 4 High speed photograph of welding metal transfer under controlled condition φ1.2 mm, 120 A

还有一点应特别引起注意的是在常规的 CO₂焊短路过渡过程中在缩颈形成时, 由于短路电流处于峰值, 它对已成为缩颈的短路液桥仍具有较强的具有轴对称特征的压缩作用。液体小桥的具体表现形式为轴对称性较好, 而与焊枪与工件之间是否有相对运动和相对运动速度的大小无关。

在本文建立的 CO₂焊无爆短路过渡过程实时控制法中, 由于在缩颈形成后及时将短路电流降至“安全”水平, 缩颈处的液体金属受到的电磁压缩作用明显减小, 其位置都表现出偏向与熔池最近位置的趋势(图 4), 这一现象可以用其主要受来自于熔

池的表面张力的作用来解释。

作为对照,本文给出了 STT(表面张力过渡)法熔滴过渡过程的高速摄影结果,小桥断裂前的缩颈形状同样表现出轴对称性较差的特征(图 5)。

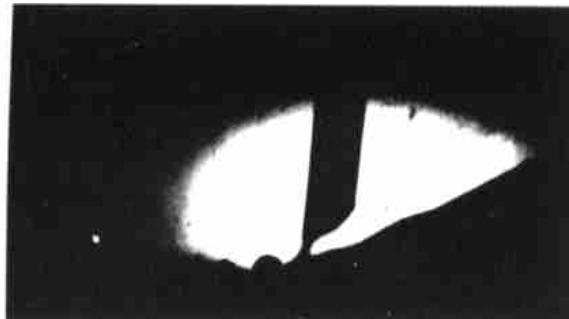


图 5 STT 条件下熔滴过渡的形态(1 200 帧/s)

Fig. 5 High speed photograph of metal transfer under STT condition $\phi 1.2 \text{ mm}$, peak current 400 A, based current 50 A, feeding speed 4.0 m/min

3.3 飞溅率测试结果

采用称重法,研究了焊接过程中的飞溅率。表 1 给出测试结果,并与 STT 法(美国林肯电气公司 STT 焊机)的飞溅率做了比较。

表 1 焊接飞溅率的比较

Table 1 Spatter loss coefficient

| | Welding currents I/A | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| Spatter loss coefficients $\eta(\%)$ | $\phi 1.0 \text{ mm}$ (no controlled) | 4.7 | 5.0 | 6.2 | 9.3 | - |
| | $\phi 1.2 \text{ mm}$ (no controlled) | 4.2 | 4.7 | 5.1 | 8.6 | 10.7 |
| | $\phi 1.0 \text{ mm}$ (controlled) | 0.3 | 0.7 | 0.9 | 1.0 | - |
| | $\phi 1.2 \text{ mm}$ (controlled) | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 1.1 | 1.4 |
| | $\phi 1.0 \text{ mm}$ (STT) | ~ | 0.3 | 0.7 | 0.9 | 1.0 |
| | $\phi 1.2 \text{ mm}$ (STT) | ~ | 0.4 | 0.8 | 1.0 | 1.3 |

使用传统方法焊接时,在一定范围内伴随着焊接电流的增加必然提高短路过渡的频率和液体小桥爆断时的电流值,使得飞溅产生的频率和每次爆断损失的金属量都大大增加,因而其飞溅率在焊接电流增加时呈急剧上升的变化趋势。

当采用 CO₂ 焊无爆短路过渡实时控制法焊接时,在一定的焊接电流范围内均可获得稳定的焊接过程。观察示波器电压、电流波形及飞溅金属颗粒,发现无大颗粒飞溅出现,由于对瞬时短路和电爆炸现象均能对其进行有效的控制,因此可大大降低焊接时的飞溅。其飞溅率基本达到应用 STT 法焊接时的水平,而且飞溅呈细末状,散布的范围也较小,非常便于清除。

4 结 论

(1) 本文提出的 CO₂ 焊短路过渡过程闭环实时控制方案是控制 CO₂ 焊短路过渡过程的一个新途径。该方案采用定时控制与定状态控制的混合控制法,能够根据焊接电弧的瞬时要求对短路过渡过程进行闭环控制,具有很高的动态响应速度及对焊接过程较强的适应能力。由于组成本控制方案的检测系统和控制系统能以附加的形式安装于 CO₂ 弧焊设备之上,故具有较高的推广价值。

(2) 研究了 CO₂ 焊短路过渡过程在一个过渡周期中特别是在短路期间电流的行为。认为只需在熔滴与熔池短路的瞬时和液体小桥即将爆断的时刻将短路电流降至“安全线”以下即可有效地抑制由于瞬时短路和小桥爆断引起的飞溅。

(3) 采用本控制方法后,液体小桥爆断时的功率大为降低。由于液体小桥爆断瞬时电弧功率较低,可获得飞溅量较少的过渡过程。而且飞溅呈细末状、散布的范围窄,便于清除,效果显著。

参考文献:

- [1] 潘雪峰,等.IGBT 逆变式波形控制 CO₂ 弧焊电源研究[J].电焊机,1996,(6): 16~18.
- [2] 韩赞东,等.短路过渡 CO₂ 焊接波形控制的研究[J].焊接,1997,(1): 6~8.
- [3] (美)林肯电气公司.控制短路型焊接系统的方法和装置[P].中国发明专利,87103550.2 1987.
- [4] Stava E K.The surface-tension-transfer power sources: a new low-spatter arc welding machine[J]. Welding Journal, 1993, 72(1): 25~29.
- [5] 原田章二,等.CO₂ 焊、MAG 焊接中减少飞溅的方法[J].刘阳春译.国外金属加工,1994,(6): 38~45.
- [6] 耿传勇,刘加友,尹海,等.微机控制 STT 逆变焊机的研制[J].焊接学报,1998,19(增刊): 64~69.
- [7] 里强,杨世彦,王其隆.CO₂ 气体保护焊短路过渡过程液相金属桥稳定性分析[J].焊接学报,1998,19(增刊): 106~111.
- [8] 李桓,邓黎丽,李俊岳,等.CO₂ 短路过渡焊电弧及熔滴状态的检测方法[C].第九次全国焊接会议论文集(第二册),1999,522~525.

作者简介: 李桓,男,1955 年 7 月出生,博士学位,副教授。现任中国焊接学会熔焊工艺及设备委员会委员,研究方向为焊接电弧物理、焊接工艺及设备等,承担过国家自然科学基金委员会、国家教育部、天津市科委及石油天然气总公司等许多重要课题并多次获奖,取得国家专利 4 项,发表论文 30 余篇。

(编辑:董卫国)