

# 数字控制复合型高频脉冲 TIG 焊接系统及其工艺特性

闫思博<sup>1</sup>, 宋永伦<sup>1</sup>, 张万春<sup>2</sup>, 罗传光<sup>2</sup>

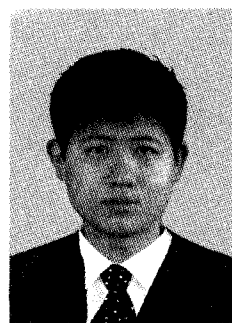
(1. 北京工业大学 机械工程及应用电子技术学院, 北京 100124;

2. 中国航天科技集团公司长征 机械厂, 万源 636371)

**摘 要:** 针对现有开关电源的动特性限制, 难以实现高频( $\geq 20$  kHz)脉冲电流输出. 采用新型主电路拓扑结构, 辅以 DSP(数字信号处理器)和 CPLD(复杂可编程逻辑器件)为控制核心的数字化控制系统, 研制了数字控制复合型高频脉冲 TIG 焊接系统. 设计有效的时序控制方案和电源外特性控制方案并配合切实有效的控制算法及保护电路, 实现了与现有 TIG 焊工艺过程的有效复合, 可进行稳定的高频焊接. 结果表明, 复合型高频脉冲 TIG 焊具有良好的工艺特性, 表现为铝合金焊缝熔合线两侧的气孔显著减少, 并在熔合线母材侧形成明显细晶区. 从而开创了一种新型高品质焊接热源.

**关键词:** 数字控制; 复合型; 高频脉冲; 工艺特性

**中图分类号:** TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)07-0071-04



闫思博

## 0 序 言

铝合金在航空航天、国防军事等工业领域具有重要地位, 为了获得良好的焊接接头, 在铝合金焊接中主要采用变极性 TIG 焊接工艺. 变极性 TIG 焊接过程中, 其直流正接(DCEN)、直流反接(DCEP)的持续时间和电流均独立可调. 因此, 可以通过不同的参数匹配实现对电弧形态、焊缝成形以及阴极清理区域的优化, 提高了焊接接头的质量.

众所周知, 在焊接过程中加入脉冲能量具有促进熔池形成、改善热源形态、提高电弧能量和细化晶粒等效果<sup>[1-3]</sup>. 近年来, 把高频脉冲电流引入金属凝固过程中, 是凝固控制技术在焊接中的重要进展. 将电流、磁场、超声波等多物理场作用于金属的凝固过程, 很大程度上改善并提高了金属凝固组织性能<sup>[4,5]</sup>. 尤其对于高强铝合金材料的焊接, 能显著减少和消除各类冶金损伤(如宏、微观气孔, 熔合线附近的粗晶带、焊缝的粗大柱状晶以及微裂纹等). 然而, 受制于单一电源动特性的限制, 当前工程中采用的脉冲电弧频率多在 5 kHz 以下. 针对上述问题, 研制了复合型脉冲 TIG 焊设备及方法, 通过电流传感器进行时序同步, 可在任意现有焊接电源的输出波形基础上实现高频脉冲能量( $\geq 20$  kHz)的复合, 频率、幅值等各项脉冲参数均独立可调. 在继承传

统的 TIG 焊工艺优点的基础上, 已较好的体现出高频脉冲复合能量焊接热源对熔池与焊接接头的工艺特性.

## 1 复合型高频脉冲 TIG 电源设计

### 1.1 复合型高频脉冲 TIG 焊接系统总体设计方案

鉴于当前技术所限, 在单一电源上实现变极性波形和高频脉冲能量的输出在实际应用中仍存在可行性的问题. 为此, 研究工作的思路是在传统变极性 TIG 焊优势的基础上, 不改变现有变极性电源输出方式及控制模式的基础上, 妥善处理了回路寄生电感对高频能量传输的影响. 设计了专门用于复合脉冲能量的焊接电源, 将其与变极性电源进行并联, 通过电流传感器进行同步, 可在任意现有变极性 TIG 焊接电源上实现高频脉冲能量的复合, 频率、幅值等各项脉冲参数均独立可调. 脉冲电流幅值在 0~100 A 内、脉冲频率在 0~100 kHz 及占空比均连续可调.

图 1 为一种将高频脉冲电源与已有商品化焊接电源进行组合的结构示意图. 如图 1 所示, 复合焊接电源与高频发生装置之间的能量传递并无高频成分存在, 对电缆及其长度无特殊要求, 而复合高频发生装置采用了特殊的结构设计, 体积小巧, 在自动焊场合, 能直接与焊枪耦合, 避免了电缆寄生电感对高频脉冲能量传递的影响, 保证高频能量有效地复合到电弧中.

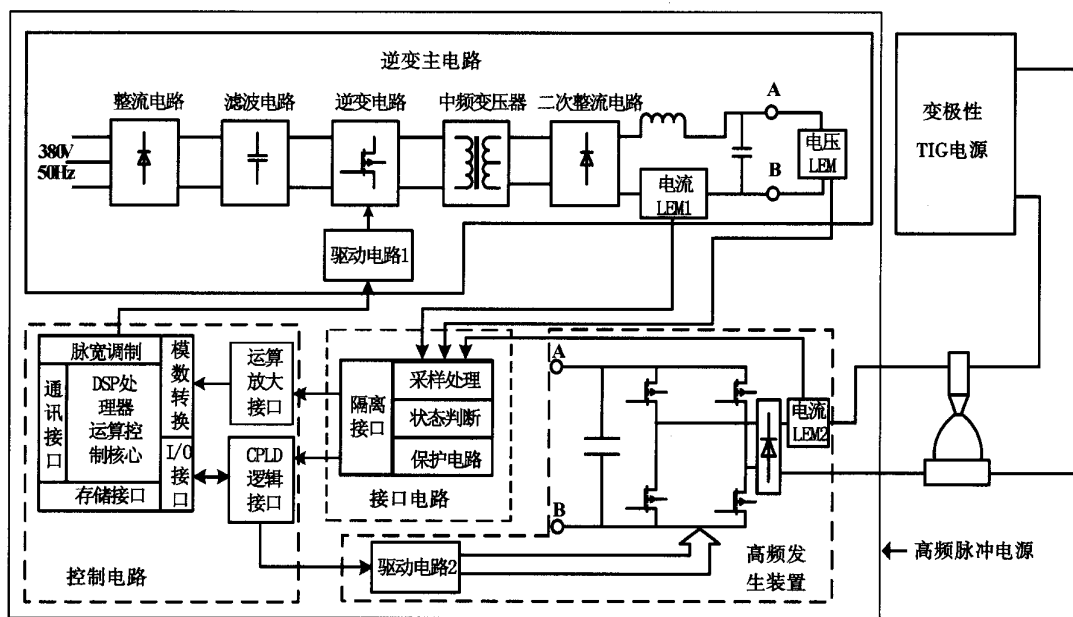


图 1 脉冲复合电源系统框图

Fig. 1 Block diagram of assembled pulse TIG power

## 1.2 复合脉冲电源硬件设计

复合型高频脉冲 TIG 焊接系统由普通焊接电源和高频脉冲电源并联组合而成。高频脉冲电源在预设的时间内进行脉冲能量输出,并不对普通焊接电源自身的输出形式和控制方式造成干扰。高频脉冲电源主要由四部分构成。(1)功率部分采用逆变频率的 20 kHz 的半桥逆变拓扑结构,电源最大输出功率 2 000 W,空载电压 60 V;(2)数字控制电路采用 TMS320F2812 数字信号处理器(DSP)作为控制核心,对焊接过程参数进行运算控制,配合复杂可编程逻辑器件(CPLD)完成各种状态信号的逻辑处理和驱动信号的时序控制,利用数字化控制系统易于实现柔性化控制的特点,功率部分的输出外特性可根据焊接状态实时调节;(3)接口电路包括采样处理、状态判断和保护信号三部分,对焊接过程中的各种状态进行反馈和判断,经光耦隔离后传递给控制电路;(4)高频发生装置采用全桥拓扑结构,通过调节四个功率 MOSFET 的驱动信号,可实现不同占空比及频率的脉冲能量。由全桥电路产生的交流信号经整流后变成直流脉冲信号,采用全桥拓扑结构的优势在于可以有效降低功率开关管的工作频率和产热,当设定 100 kHz 的脉冲输出频率时,开关管的工作频率仅为 50 kHz。从而改善和解决了单一电源输出高频能量的传递问题,亦克服了机械式“超声”能量耦合在实际应用中的局限性。

## 2 复合型高频脉冲 TIG 电源控制方案

### 2.1 复合脉冲电源软件设计

复合脉冲电源与普通电源共用焊枪信号,焊接开始后,复合脉冲电源先根据预设参数进行一定时间的延时,主要目的有两个,一是由于 TIG 焊工艺往往采用高频高压引弧,此时电压脉冲峰值往往在 1000 V 以上,易造成其它电子器件的损坏,因此要在引弧成功后再进行脉冲能量复合;二是要等待焊接电源执行完引弧参数,进入焊接参数后再进行复合能量输出。确定进入正常焊接参数后,DSP 控制 CPLD 输出预设占空比的 PWM 信号驱动复合高频发生装置产生脉冲能量,同时输出另一路 PWM 驱动信号给功率部分,并对 AB 端电压及脉冲输出电流进行采样,由于脉冲电流频率高于逆变电源控制频率,为保证电流脉冲输出的一致性,电流采样时刻被设定在峰值电流末期,由单独一路脉冲信号进行外触发,并将一个控制周期内的转换结果进行平均化处理,送入 DSP 进行 PI 计算,调整向功率部分输出的 PWM 占空比。

### 2.2 复合型高频脉冲 TIG 焊接系统工作原理

由于逆变功率部分的工作频率为 20 kHz,若要实现 20 ~ 100 kHz 区间内的高频脉冲电流输出在理论上是无法完成的。因此,系统利用恒压外特性对脉冲电流进行控制。其基本原理为,复合脉冲电源

功率部分采用恒压外特性进行输出,A、B点之间并联  $200\text{ V}/10\ 000\ \mu\text{F}$  电容,以保证复合高频发生装置输入端接近理想恒压源,当DSP采样电流LEM1的输出信号并判定开始复合高频能量时,CPLD输出预设占空比的PWM信号驱动  $Q_1 \sim Q_4$  进行工作见图2(图2中下图是LEM1的输出信号,经配置后其输出形式为电压输出,传感器输出1V电压对应当前焊接电流100A,输出2V对应200A电流,以此类推。),当其中一路桥臂开通时(如  $Q_1$  和  $Q_4$ ),相当于在电弧两端施加了一定幅值的电压,对电弧进行短时间的放电,有效控制PWM占空比便可有效控制复合在电弧上的脉冲频率,脉冲电流的幅值主要取决于加在电弧两端的电压高低,通过调整电源电压输出便可有效调整脉冲电流的幅值。这一方案有效消除了焊接电源逆变频率对输出电流脉冲频率的限制,使得电源可以进行远高于自身逆变器工作频率的高频脉冲电流输出;此外,由于传统PID控制过程中的微分项运算和参数调整较为复杂,在提高系统的动态品质的同时,占用了过多的系统周期,从而降低了响应的快速性,因此,仅选用增量式PI调节对电源输出进行控制,经试验证明,上述控制模式有效保证了脉冲电流输出的一致性。文中系统所采用的利用恒压源控制脉冲电流的方式属于一种半开环的控制模式,由于焊接过程中负载的变化非常剧烈,甚至会有短路情况发生,因此,系统采用硬件方式限定了电流的脉冲峰值,利用高精度的霍尔电流传感器实时监控  $Q_1 \sim Q_4$  的导通电流,一旦脉冲电流峰值超过设定电流峰值的20%,CPLD会立刻关断本周期的驱动信号保护功率管。

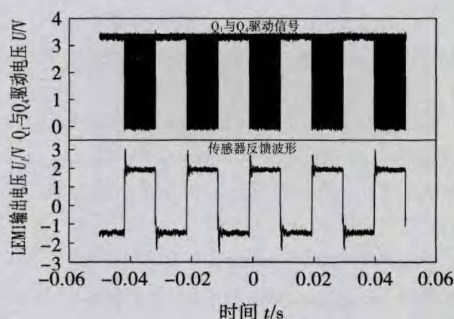


图2 LEM1输出信号与  $Q_1 \sim Q_4$  驱动信号

Fig. 2 Signal of LEM1 output &  $Q_1(Q_4)$  driving signal

### 3 试验及分析

#### 3.1 复合电源的输出特性

采用复合型高频脉冲TIG电源对2219铝合金

材料进行了对接坡口的2325填充丝焊接,所用的钨极直径为3.2mm,采用高纯氩气保护,气体流量12L/min,焊接速度300mm/min,采用TEKtronix TBS3052型示波器对焊接过程中电流电压信号进行采集,得到了实际焊接工艺电流波形如图3所示。试验证明,直流反接(DCEP)阶段并不适合进行高频脉冲能量的复合,这主要是由于直流反接期间工件发射电子,高频脉冲能量的复合会导致工件表面阴极斑点的剧烈跳动,从而导致电弧的不稳定。因此,高频脉冲能量只适用于在直流正接(DCEN)期间进行复合,为最大程度地发挥复合脉冲能量的作用,变极性波形选用EWM焊机提供的特殊交流波形进行复合,在充分保证阴极清理作用的同时,最大限度的增加了直流正接(DCEN)持续时间,更有利于高频脉冲能量发挥效用。从图3中可以看出,高频脉冲能量被有效地复合在直流正接时段内,复合电源协调良好,焊接过程稳定可靠。

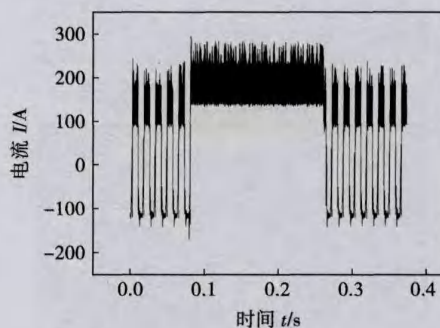


图3 交流20kHz高频脉冲复合电流波形

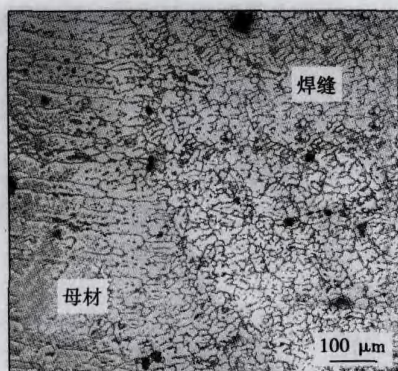
Fig. 3 Current waveform of AC-TIG with 20 kHz current pulse assembled

#### 3.2 高频复合热源的工艺特性

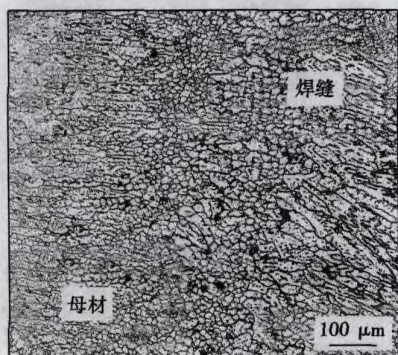
高频复合焊接热源在工艺方面主要表现为两个特点:一方面,对极易产生宏微观气孔的铝合金焊接接头来说,采用复合高频脉冲方式焊接,焊缝的气孔率明显降低。在焊缝成形上表现为复合高频能量提高了电弧挖掘能力,电弧可直接作用于熔池底部,在电弧的脉动冲击作用下,熔池内的液体金属产生有规则的循环流动,将熔池中的气泡破碎细化并促进气体的逸出;另一方面,较高频率的电弧激励与对熔池的搅拌作用会增加结晶的成核率从而细化了焊缝组织。但在试验中注意到,脉冲频率对熔池的激励作用与焊接工况(如工件厚度、焊接速度、熔池尺寸以及焊丝的填充量等)密切相关并直接对高频的复合效果产生影响。其中,尤其是熔池对于高频能量激励有效吸收的定量检测与规律的认识,

将是调整和优化复合高频脉冲焊接参数、获得具有实用意义“工艺窗口”的一个关键。

图 4 为焊缝显微组织。由图 4a 可见,未加高频脉冲的铝合金焊缝融合线附近可见直径为几十微米级的微气孔且近熔合线母材侧的晶粒较为粗大;而由高频复合焊接得到的焊缝(图 4b)已未见可分辨的气孔存在,并且在熔合线母材侧有一细晶粒带区。从而为固溶型铝合金焊缝软化区导致的接头综合性能下降问题提供了解决的途径。



(a) 未复合高频能量焊缝熔合线附近组织



(b) 复合高频能量后焊缝熔合线附近组织

图 4 焊缝显微组织

Fig. 4 Microstructure of welded joint

## 4 结 论

(1) 针对现有焊接电源特性无法实现高频脉冲电流输出的限制,在不改变已有商品化电源输出

方式和控制模式的基础上,研制了以 DSP + CPLD 为控制核心的数字化复合型高频脉冲 TIG 电源系统。采用新型拓扑电路设计,摆脱了逆变电源自身工作频率对脉冲电流频率的限制,实现了远高于电源逆变频率的高频脉冲电流输出。

(2) 利用数字化控制系统易于实现柔性化控制的特点,针对上述电源系统设计了完善的时序控制程序及 PI 调节算法。保证了数字控制复合型高频脉冲 TIG 焊接电源工作稳定,实现了与多种不同形式的基础波形的有效复合。

(3) 复合高频脉冲电源的工艺特性表现在铝合金材料焊缝气孔数量的显著减少;同时,高频能量也起到了晶粒细化的作用,在熔合线处形成了一条明显的细晶区域,有利于接头综合性能的提高。

## 参考文献:

- [1] Song Yonglun, Yan Sibao, Xiao Tiaojiao, *et al.* A study on the macro-micro physical properties in pulsed arc plasma[C] // Proceedings of the Visual-JW2010 Organized by JWRI, (Invited lecture), Osaka University, Japan. 2010, 13 - 18.
- [2] Sun Q J, Lin S B, Yang C L, *et al.* Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14: 765 - 768.
- [3] He S X, Sun B D, Zhou Y H, *et al.* Effect of high density pulse electric current on solidification structure of low temperature melt of A356 alloy[J]. Transactions Nonferrous Metal Society of China, 2002, 3: 414 - 418.
- [4] Liao Xiliang, Zhai Qijie, Chen Wenjie, *et al.* Refining mechanism of electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum[J]. Acta Materialia, 2007, 55: 3103 - 3109.
- [5] 方 燕, 廖希亮, 甘长红, 等. 中频低压脉冲电流对纯铝凝固组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(3): 141 - 143.  
Fang Yan, Liao Xiliang, Gan Changhong, *et al.* Effects of pulsed electric current with main frequency and low voltage on grain refinement of pure aluminum[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(3): 141 - 143.

**作者简介:** 闫思博,男,1983 年出生,博士研究生。主要从事数字化焊接电源及工艺研究。Email: yansibo@emails.bjtu.edu.cn

**通讯作者:** 宋永伦,男,教授。Email: ylsong@bjat.edu.cn