新型电子束焊机阴极加热电源自动调节系统

徐国宁 齐铂金 刘方军 代海林

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 开发了一种新型电子束焊机阴极加热电源自动调节系统,包括新型主电路拓扑和对应控制策略,该系统能够使阴极处在最佳加热电流状态,从而提高电子束流稳定性. 并且在检测到电子枪未加高压时,阴极加热电流自动关闭,在加有高压但束流给定为零时,阴极加热电流自动减少,能大幅增加阴极的使用寿命. 经试验证明该系统相比传统阴极加热电源操作简洁、快速和准确,对焊缝成形质量好.

关 键 词: 电子束焊接; 阴极加热电源; 阴极最佳加热电流; 自动调节系统

中图分类号: TG 439.3; TM 89

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)03-0380-04

New automatic regulation system of electron beam welder cathode heating source

Xu Guoning Qi Bojin Liu Fangjun Dai Hailin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: One new electron beam welder cathode heating current automatic control system was developed, which includes new main circuit topology and corresponding control strategy, and it can make cathode be optimal heating current status and improve electron beam stability. At the same time, cathode heating current can be turned off automatically when no high voltage, and cathode heating current can be reduced automatically when electron beam current import is zero, thus it can increase cathode life time. The test proves that this system operates simply, rapidly and exactly, and it can make good welding seam comparing with traditional cathode heating source.

Key words: electron beam welding; cathode heating source; cathode optimal heating current; automatic control system

电子束焊接以高能量密度、高熔透性、焊接变形区小、能焊接难熔及异种金属等优点在航空航天领域发挥着不可替代的作用. 电子束焊接的基本原理是电子枪中的阴极(灯丝)直接或间接加热发射电子,该电子在高压静电场的加速下再通过电磁场的聚焦就可以形成能量密度极高的电子束,用此电子束去轰击工件,巨大的动能转化为热能,使焊接处工件熔化,形成熔池,从而实现对工件的焊接. 研究及试验表明[1-2]:阴极加热电流的稳定与否直接影响电子束斑的质量和电子束的能量密度,同时还会影响阴极的寿命. 近年来随着脉冲电子束焊接、多束电子束焊接等新型电子束焊接技术的出现,对阴极加热电流的稳定性提出了更高的要求. 传统阴极加热电源一般按经验值调节阴极加热电流值,并不能每次使阴极加热电流处在最佳工作状态,为此本文开发了一套新型电子束焊机阴极加热电源自动调节系统,经试验证明该系统相比传统阴极加热电源大大提高了电子束流稳定性和阴极的使用寿命.

1 自动调节系统原理

电子束焊接电源由加速高压电源、阴极加热

收稿日期: 2011-04-18; **网络出版时间**: 2012-03-20 10:38

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120320.1038.012.html

作者简介: 徐国宁(1981 -),男,山东潍坊人,博士生, guoningxu@me.buaa.edu.cn.

电源和栅极偏压电源组成,如图 1 所示,其中阴极加热电源是给阴极加热产生电子的电源. 阴极按照加热形式可分为直热式和间热式两种,间热式是利用传导辐射或电子轰击的方法间接加热阴极,但其结构复杂,不容易更换. 本文采用直热式,加热方式是直接加热阴极,其特点是结构简单,操作方便. 阴极加热电源一般采用交流和直流两种,当采用交流电源时,在工件上的电子束焦点会作周期性摆动,而采用直流电源时,电子束焦点在工件上产生的位置是固定的,为此本文采用直热式直流阴极加热电源.

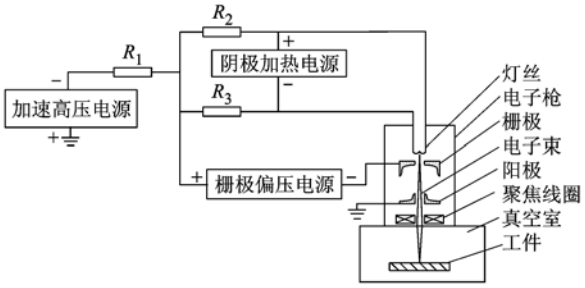


图 1　电子束焊接电源总图

在加速电压和束流给定不变的情况下,束流与阴极加热电流有一个对应关系,如图 2 所示[3]. 从图中可以看出,当阴极加热电流 I_H 增大时,束流 I_S 跟随增大,当阴极加热电流 I_H 增大至某一值,如 b 值时,此时再增大阴极加热电流 I_H,束流 I_S 基本不变. 但如果阴极加热电流 I_H 超过 b 点太多,就会降低灯丝的使用寿命. 因此本文开发了一套阴极加热电源自动控制调节电路,使得阴极加热电流能够自动寻找到 b 点电流值,使其束流保持在最佳工作状态. 而且使电子枪在加有高压并且束流给定不为零时,阴极加热电流处在最佳值. 而未加高压时,阴极加热电流自动关闭,在加有高压但束流给定为零时,阴极加热电流能自动减少,大幅提高阴极的使用寿命.

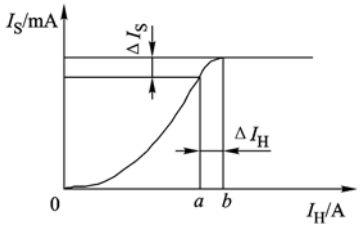


图 2　束流与阴极加热电流关系

2　阴极加热电源主电路拓扑

本文根据阴极加热电流要求稳定度高、调节快速准确等特点采用由高性能 IGBT T_{r1}、功率二极管 D_1、电感 L_2 和电解电容 C_2 组成 Buck 斩波电路和由电容 C_3 和 C_4、高性能 IGBT T_{r2} 和 T_{r3} 组成的半桥逆变电路作为前级电路,开关频率为 20 kHz,开关频率较高,故滤波元件参数选用较小值,便可获得平稳的直流高压,从而有效地减少了系统的时间常数,提高了调节和响应速度. 变压器采用高频变压器,既可以减少体积和重量,又可以提高转换效率. 后级电路放在高压油箱内,由全桥整流和滤波电路组成,其主电路拓扑如图 3 所示. 前级采用 Buck 斩波电路主要是把不可控的直流电变成可控直流电,起预稳作用.

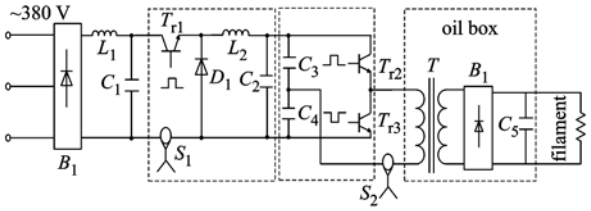


图 3　阴极加热电源主电路拓扑

3　阴极加热电源控制电路设计

本文利用 TMS320LF2407 芯片进行实时数据采集和处理,并采用 WEINVIEW MT6100i 触摸屏作为人机交互界面. TMS320LF2407 集成了 16 通道脉宽调制 PWM、16 通道 10 位 A/D 转换器、串行接口 SCI 模块和控制器局域网络 CAN 模块等,丰富的资源与 64 kByte 的外部寻址接口能很好地满足控制系统的设计要求[4]. WEINVIEW 触摸屏支持 MODBUS 通信协议,本文通过编写专门针对 DSP 的 MODBUS 协议实现触摸屏与 DSP 相互通信,其控制系统结构如图 4 所示,电子束焊接电源触摸屏界面如图 5 所示.

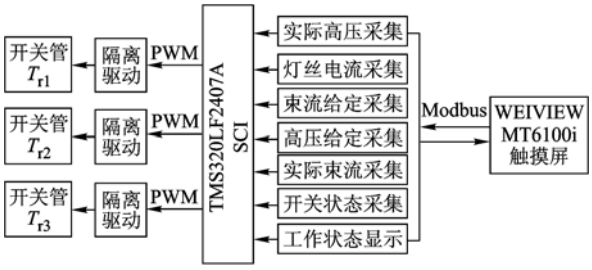


图 4　控制系统结构图

目前,阴极加热电源控制系统一般采用稳压或稳流单独调节方式,但这两种方式存在各自的弊端. 采用稳流方式时,由于灯丝在工作过程中容易烧断,灯丝一旦烧断,变压器副边电流迅速降为零,稳流电路由于闭环电路调节将原边电流不断抬高,使得原边电压调至最大,对电源造成损坏. 采用稳压方式时,因为在阴极灯丝加热后,表面金属被蒸发,阴极截面积减少,电阻值逐渐增大,使

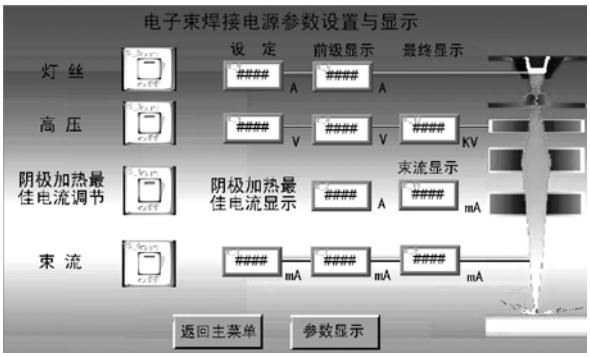


图 5 电子束焊接电源触摸屏界面

灯丝加热功率逐渐减小,影响阴极电子发射,从而影响电子束流稳定性. 因此本文提出通过电流外环、电压内环的双闭环控制模式,如图 6 所示,该控制模式既能达到电源稳流、又能恒压、限压和故障保护等多种功能.

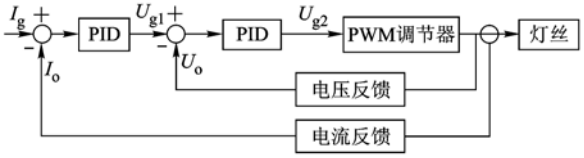


图 6 双闭环控制原理图

工作过程:首先将电流反馈 I_o(电流反馈环节将电流信号转换成电压信号)与给定电流 I_g 进行比较,同时把进行电流环 PID 调节以后的输出值 U_{g1} 作为电压闭环调节的给定值与电压反馈值 U_o 作比较,再将 U_{g1} 和 U_o 比较以后的值送 PID 调节器,最后,通过电压环 PID 调节器的输出值 U_{g2} 去控制 PWM 数字脉冲产生开关管控制信号,从而达到调节输出电流和限压的目的.

4 自动调节系统软件设计

电子束焊机软件编程采用汇编语言与 C 语言混合编写,其中阴极加热电源自动调节系统软件设计流程如图 7 所示.

当按下图 5 触摸屏界面的阴极加热最佳电流调节的按钮时,阴极加热电流给定从零开始按固定值递增,同时采集束流反馈,然后进行两次束流反馈比较,如果 $\Delta I_S < a$(固定值),则停止阴极加热电流给定递增并在触摸屏上显示出阴极加热电流给定值,如果不满足 $\Delta I_S < a$,则阴极加热电流给定递增,进行下一轮循环,直到满足条件找到阴极加热最佳电流. 同时在程序中循环的检测高压反馈和束流给定,如果检测到高压满载同时束流给定为零,则阴极加热电流给定自动减少,如果检测到高压未满载,则阴极加热电流直接给定为零.

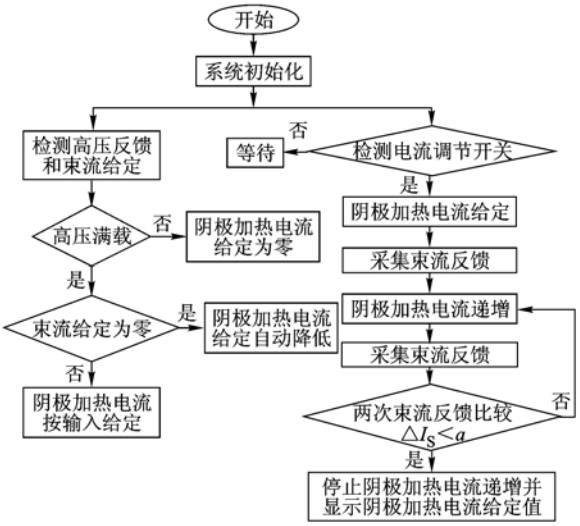
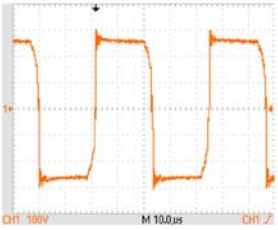


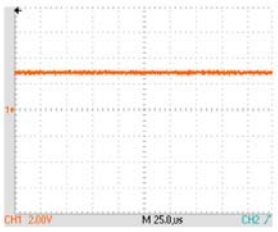
图 7 自动调节系统软件流程

5 试 验

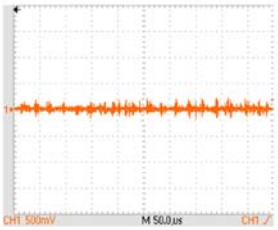
对新型阴极加热电源自动调节系统在焊接过程中进行测试,按照最佳阴极加热电流值给定,测试波形如图 8 所示.



a 变压器 T 原边电压波形



b 阴极加热电流采样电流



c 阴极加热电流采样电流纹波

图 8 阴极加热电源测试波形

图 8a 是工作过程中变压器 T 原边波形,可见,变压器 T 原边波形精度高和无畸变;因为电子束焊机的阴极串联在高压电路中,实际电流回路放在高压油箱内测量困难,因此本文采样采用控制前级回路电流作为反馈控制阴极加热电流.

图 8b 是阴极加热电流采样电流,采样值为 3 V(电流采样信号转换成电压信号),对应实际电流值为 18 A(实际电流值是采样值的 6 倍). 图 8c 是采样电流纹波,从中可以看出采样电流纹波在 200 mV 之内,说明采样电流纹波系数小,阴极加热电流稳定度高. 采用新型阴极加热电源自动调节系统对3 mm厚度 Ti-6Al-4V 钛合金板进行表面聚焦电子束焊接试验,具体焊接参数如表 1 所示. 焊缝形貌如图 9 所示.

表 1　试验用焊接工艺参数

试件	电子束流 I_S/mA	加速电压 U/kV	聚焦电流 I_f/mA	加热电流 I_h/A	焊接速度 v/(mm·s^{-1})	热输入/(kJ·m^{-1})
a	10	55	710	18	8	68
b	13	55	710	18	8	89
c	13	55	710	15	8	89
d	13	55	710	12	8	89

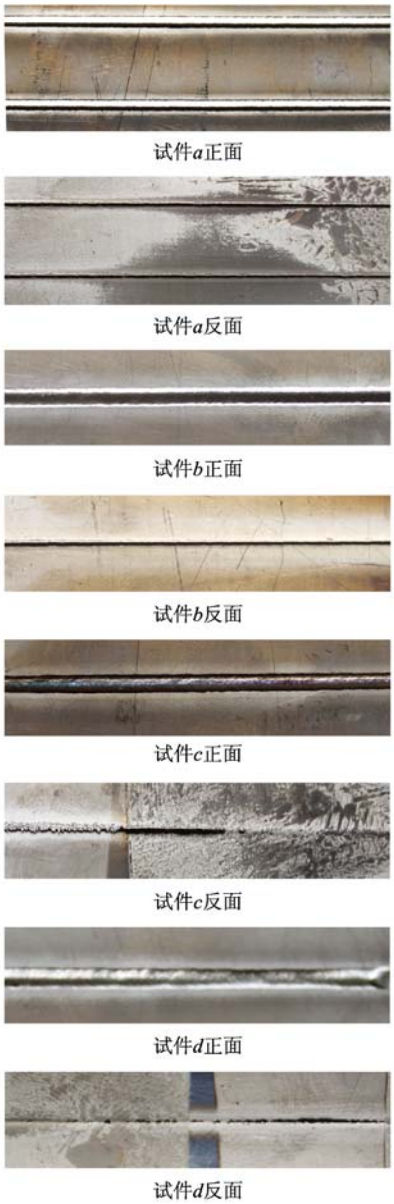


图 9　电子束焊缝形貌

试件 *a* 和试件 *b* 是采用该系统得到的阴极最佳加热电流进行焊接,而试件 *c* 和试件 *d* 是用其他数值阴极加热电流焊接. 试件 *a* 的两组焊缝为采用两组相同的试验参数进行焊接获得,从试件 *a* 正面和反面成形可以看出两条焊缝上表面宽度一致,弧纹均匀,焊接穿透深度均匀,说明该系统稳定性好,可重复性强;试件 *b* 采用比试件 *a* 大一些的电子束流进行焊接,从试件 *b* 正面和反面成形可以看出,随着电子束流的增加焊缝宽度略有增加;试件 *c* 和试件 *d* 采用比阴极最佳加热电流低的阴极加热电流进行焊接,其他参数不变,从图中可以看出试件 *c* 正面成形比较均匀,但反面有的地方焊透,有的地方未焊透,试件 *d* 的正面成形有缺陷,反面焊透性也不均匀. 试件 *c* 和试件 *d* 的焊缝成形缺陷说明在两试件在焊接过程中束流处于不稳定状态.

6　结　论

本文开发的新型阴极加热电源自动控制系统相比传统阴极加热电源操作简单、快捷,省去了传统阴极加热电源每次灯丝使用一段时间或更换灯丝后要不断调试参数的时间和提高其准确性,并采用新型主电路拓扑和双闭环控制策略使阴极加热电流纹波系数小和控制方式更科学.

利用开发的新型阴极加热电源自动控制调节系统对 Ti-6Al-4V 钛合金板进行电子束焊接试验,试验表明应用此调节系统得到的最佳阴极加热电流进行焊接,从焊缝宏观形貌看,焊缝表面宽度一致,弧纹均匀,焊接穿透深度均匀,说明该系统能使阴极加热电流调整到一个稳定状态.

参考文献(References)

[1] 曾尚知. 焊接工艺人员手册[M]. 上海:上海科学技术出版社,1991:59 - 63
Zeng Shangzhi. Weld technics personnel manual[M]. Shanghai: Shanghai Science & technology Press, 1991: 59 - 63 (in Chinese)

[2] American Welding Society. Recommended practices for electron beam welding[M]. Miami: American Welding Society, 1999

[3] Schultz H. Electron beam welding[M]. Abington: Abington Publishing, 1993: 13 - 14

[4] 刘和平,王维俊,江渝,等. TMS320LF240x DSP C 语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003:1 - 10
Liu Heping, Wang Weijun, Jiang Yu, et al. TMS320LF240x DSP C language exploitation and application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003: 1 - 10 (in Chinese)

(编　辑:文丽芳)