2012 年 10 月 北京航空航天大学学报 October 2012
第38卷 第10期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol. 38 No. 10

新型脉冲电子束焊接偏压电源设计

齐铂金 徐国宁 刘方军 肖 攀

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 开发了一种由偏压基值产生电路和偏压脉冲产生电路组成的新型脉冲电子束焊接偏压电源,该偏压电源装置能够实现直流偏压和脉冲偏压自由切换,即在同一套装置上既能够实现常规连续束流电子束焊接,又能够实现脉冲电子束流焊接. 偏压基值产生电路控制偏压脉冲基值,偏压脉冲产生电路分别控制偏压脉冲峰值、偏压脉冲频率和偏压脉冲占空比. 偏压电源的脉冲频率、占空比、脉冲基值和脉冲峰值均可调节,对应实现脉冲束流的脉冲频率、占空比和脉冲峰值调节. 试验证明在平均束流焊透相同材料时,相比连续束流电子束焊接,脉冲电子束焊接热输入减少,焊缝宽度有减少趋势.

关 键 词: 脉冲电子束焊接; 偏压电源; 脉冲束流

中图分类号: TG 439.3; TM 89

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)10-1311-06

Pulsed electron beam welding grid power supply design

Qi Bojin Xu Guoning Liu Fangjun Xiao Pan

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

Abstract: A new pulsed electron beam welding grid power supply was developed, which includes gridbias base circuit and gridbias pulse circuit. The power supply can produce both direct current gridbias and pulse gridbias, in another word, it can realize not only direct current electron beam welding but also pulsed beam welding at one equipment. The gridbias base circuit controls gridbias pulse base, while the gridbias pulse circuit controls gridbias pulse peak, gridbias pulse frequency and gridbias duty ratio. The pulsed electron beam welding grid power supply can realize beam current pulsed welding, at the same time, gridbias pulse frequency, pulse duty ratio, pulse base value and pulse peak value can be adjusted continuously, and beam current pulse frequency and pulse base value can be adjusted correspondingly. The test proves that the pulsed electron beam welding impulsion effect made electron beam welding keyhole effect much more evident than direct current beam welding at the same beam current.

Key words: pulsed electron beam welding; grid power supply; pulsed beam current

1 问题提出

电子束焊接是利用会聚的连续高速电子流轰击焊件连接部位所产生的热能使被焊金属熔合的焊接方法. 脉冲电子束焊接是相对于通常所说的连续束流电子束焊接而言的,即将焊接束流调制成脉冲形式进行焊接[1-2]. 在保持同样的功率情况下,脉冲电子束焊接比传统的连续束流电子束焊接的穿透深度和深宽比要大 30% ~50%[3],能够使中压电子束焊透深度接近常规连续束流高压电子束的焊透深度[4]. 并且脉冲电子束焊接对薄壁件焊接能够起到降低热输入和防止被焊工件过热,减少焊接变形的效果. 到目前为止,通过查询国内外相关文献,脉冲电子束焊接相关研究报道还不多见.

脉冲电子束焊接电源由加速电源、阴极加热

收稿日期: 2011-11-30; **网络出版时间**: 2012-09-26 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120926.1104.011.html

作者简介: 齐铂金(1963 -),男,湖南湘潭人,教授,qbj@buaa.edu.cn.

电源和脉冲偏压电源组成,如图 1 所示,其中脉冲偏压电源产生脉冲栅偏电压,是实现脉冲束流的核心和关键.

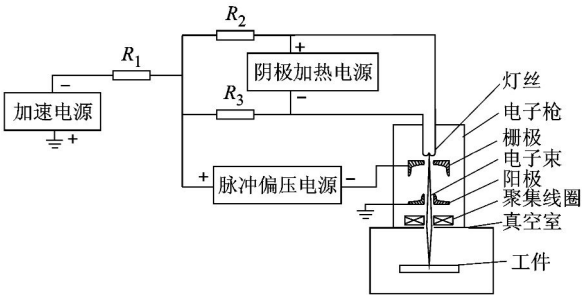


图 1 脉冲电子束焊接电源总图

脉冲偏压电源的主要作用是控制和调节脉冲电子束流,它的原理是在阴极和栅极之间加脉冲栅极偏压,通过调节脉冲栅极偏压的参数调节脉冲电子束流的参数. 其中电子束流和栅偏电压对应关系如图 2 所示[3-5].

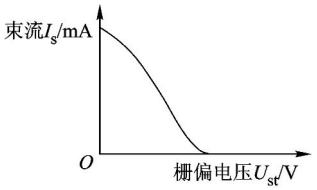
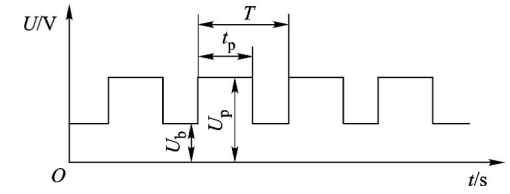


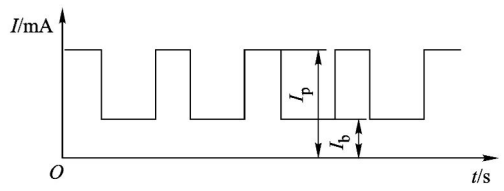
图 2 束流与栅偏电压关系示意图

从图 2 中可以看出,随着栅偏电压值增大,束流值减小,高的栅偏电压值对应小的电子束流值,低的栅偏电压值对应大的电子束流值.

根据束流与栅偏电压关系示意图,施加的脉冲偏压如图 3a 所示,对应产生的脉冲束流如图 3b 所示.



a 脉冲偏压



b 脉冲束流

图 3 脉冲束流与脉冲偏压关系示意图

脉冲偏压由基值电压 U_b 和峰值电压 U_p 组成. 当脉冲偏压在峰值电压 U_p 时,对应产生脉冲束流值为 I_b,当脉冲偏压在基值电压 U_b 时,对应产生脉冲束流值为 I_p. 通过调整脉冲偏压的基值电压 U_b 的幅值调整脉冲束流 I_p 的幅值,通过调整脉冲偏压的基值电压 U_b 的幅值调整脉冲束流 I_b 的基值,通过调整脉冲偏压的频率和占空比调整脉冲束流的频率和占空比.

从图 3 中可看出如何产生和控制脉冲基值、脉冲峰值、脉冲频率和占空比可调的脉冲偏压是本文研究的重点,脉冲偏压电源由独立的偏压基值和偏压脉冲生成主电路和相应的控制电路组成,其中的脉冲控制是通过控制前级低压电路来实现的,此模式相对后级高压脉冲控制简单可靠.

2 脉冲偏压电源主电路设计

脉冲偏压主电路拓扑如图 4 所示,脉冲偏压主电路由 2 个相互独立的偏压基值产生电路和偏压脉冲产生电路串联而成,偏压基值与偏压脉冲可独立控制与调节,其中偏压基值幅值可调,偏压脉冲幅值、频率和占空比分别独立可调.

偏压基值产生电路将 380 V 工频交流电进行三相全波整流滤波后,得到大约 540 V 左右的直流,整流滤波模块包括整流桥 B_1、滤波电感 L_1 和滤波电容 C_1;经过由功率开关管 Q_1、功率二极管 D_1、滤波电感 L_2 和滤波电容 C_3 组成的斩波降压模块将得到的直流进行调节;经过由功率开关管 Q_3 和 Q_4,电容 C_5 和 C_6 组成的半桥逆变模块把直流逆变成交流方波,连接到高频升压变压器 T_1 原边,其中半桥逆变模块预设为最大脉宽模式工作,起隔离变换作用;高频升压变压器 T_1 将原边的电压升压;最后经过由整流桥 B_2 和滤波电容 C_9 组成的高压整流滤波模块将交流方波整流为直流. 电阻 R_3 和 R_4 为脉冲基值电压的取样电阻,偏压基值产生电路输出电压正极通过限流电阻 R_1 串联到高压电源的负极.

偏压脉冲产生电路经过由功率开关管 Q_2、功率二极管 D_2、滤波电感 L_2 和滤波电容 C_4 组成的斩波降压模块将得到的直流进行调节;经过由功率开关管 Q_5 和 Q_6,电容 C_7 和 C_8 组成的半桥逆变模块把直流逆变成交流方波,连接到高频升压变压器 T_2 原边;高频升压变压器 T_2 将原边的电压升压;最后经过由整流桥 B_3 和滤波电容 C_{10} 组成的高压整流滤波模块将交流方波整流为直流. 偏压脉冲产生电路输出电压正极通过限流电阻 R_2 串联到偏压基值产生电路输出电压的负极,偏压脉冲产生电路输出电压负极串联到电子枪的栅极. 电阻 R_5 和 R_6 为脉冲峰值电压的取样电阻.

当偏压基值产生电路和偏压脉冲产生电路均

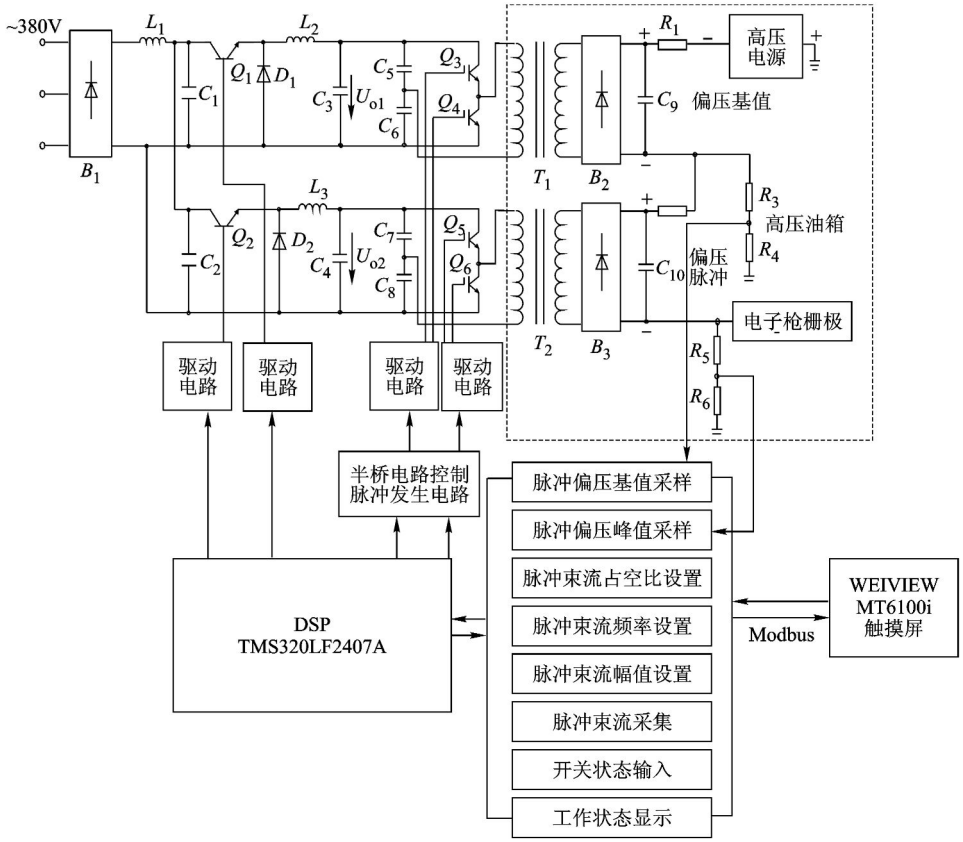


图 4　脉冲偏压电源主电路和控制电路结构图

工作时,该偏压电源能够实现脉冲偏压,即能够实现脉冲电子束焊接. 偏压基值产生电路控制偏压脉冲基值,偏压脉冲产生电路控制偏压脉冲峰值、偏压脉冲频率和偏压脉冲占空比.

当偏压基值产生电路工作,而偏压脉冲产生电路不工作时,偏压基值产生电路输出负极信号经过电阻 R_2 流经整流桥 B_3 的二极管到达电子枪栅极,此时偏压电源能够实现常规直流偏压,即能够实现常规连续束流电子束焊接.

3　脉冲偏压电源控制电路设计

本文利用 TMS320LF2407A 芯片进行实时数据采集和处理,采用 WEINVIEW MT6100i 触摸屏作为人机交互界面和 SG2525 芯片用于生成脉冲宽度调制(PWM, Pulse Width Modulation)方波. TMS320LF2407A 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 kB的外部寻址接口能很好地满足控制系统的设计要求[6]. 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. 脉冲电流峰值、脉冲电流频率和占空比等参数的设定与焊接过程的工作状态显示可以方便在触摸屏上完成,提供了良好的人机交互界面,脉冲电子束焊接电源触摸屏界面如图 5 所示.

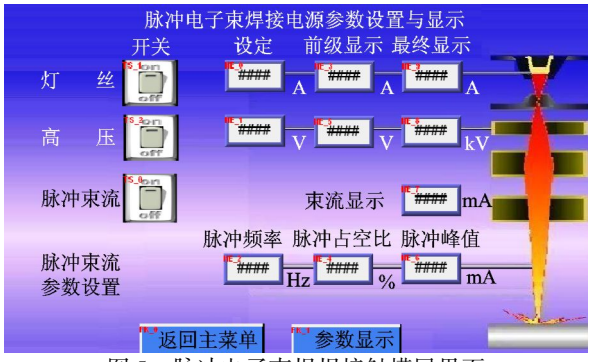
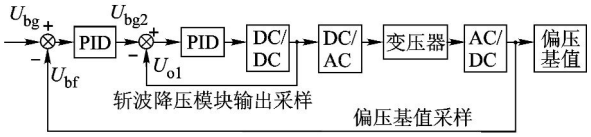


图 5　脉冲电子束焊焊接触摸屏界面

本文的控制方式为:通过分别控制偏压基值产生电路和偏压脉冲产生电路的斩波降压模块调节偏压脉冲基值和偏压脉冲峰值;通过控制偏压脉冲产生电路的半桥逆变模块实现频率和占空比可调的偏压脉冲.

偏压基值产生电路调节过程:偏压基值产生电路主要通过调节斩波降压模块闭环控制完成. 由偏压基值给定值与对应偏压基值输出反馈值进行闭环比例积分控制器(PID, Proportional Integration Differential)运算处理后,输出 PWM 方波信号;经过驱动电路后,控制斩波降压模块的开关

管,从而完成偏压基值的调节. 对偏压基值闭环调节采用电压双闭环 PID 调节,可以使得偏压基值调节更加稳定,如图 6 所示.



U_{bg}—偏压脉冲基值给定值;U_{bf}—偏压基值反馈值;U_{o1}—斩波降压模块输出电压采样;U_{bg2}—偏压基值给定值 U_{bg} 和偏压基值采样值 U_{bf} 比较后 PID 输出的中间值.

图 6 脉冲峰值闭环控制原理图

偏压脉冲产生电路调节过程:根据本文主电路拓扑结构,可以采用 2 种脉冲产生方式. 第 1 种脉冲产生方式是通过控制斩波降压模块产生偏压脉冲,即把斩波降压模块输出 U_{o2} 调制成脉冲形式,半桥逆变模块预设为最大脉宽模式工作,起隔离变换作用,从而实现最终偏压脉冲输出;调节过程为:由偏压脉冲给定值 U_{pg} 与斩波降压模块脉冲输出反馈值 U_{o2} 进行闭环 PID 运算处理后,输出 PWM 方波信号,经过驱动电路后,控制斩波降压模块的开关管 Q_2,从而完成偏压脉冲的调节. 其中偏压脉冲给定值 U_{pg} 是利用 DSP 事件管理模块 EVA 和 EVB 现有的 PWM 信号产生方式生成 PWM 脉冲,从而实现最终脉冲偏压,闭环控制原理如图 7 所示.

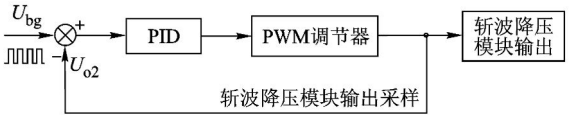


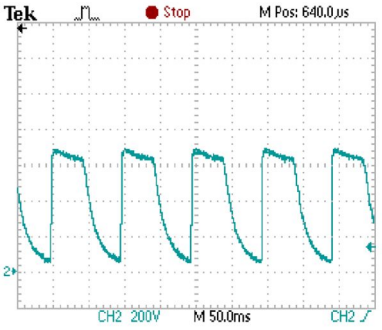
图 7 第 1 种脉冲产生方式控制原理图

由于斩波降压模块由储能元件电感和电容组成,为保证输出平稳性,电感和电容值选取较大,使得第 1 种脉冲产生方式电路动态响应差,输出波形不是严格的方波,下降沿变缓,如图 8 所示. 随着脉冲频率增高越来越明显,当脉冲频率超过 200 Hz 时波形畸变严重.

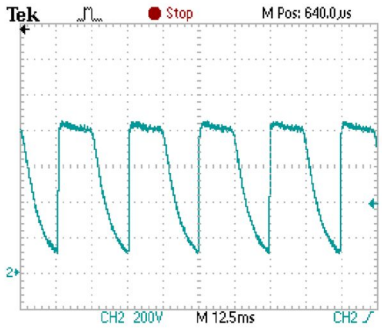
第 2 种脉冲产生方式是斩波降压模块直流输出作为偏压脉冲峰值,通过开通或关断半桥逆变模块实现最终偏压脉冲输出.

偏压脉冲产生电路中斩波降压模块主要是调节偏压脉冲峰值,为了精确控制偏压脉冲峰值,控制采用电压双闭环控制策略,实现对偏压脉冲峰值的闭环控制,闭环控制原理如图 9 所示.

实现对偏压脉冲峰值的采集是偏压脉冲峰值闭环控制中要解决的重要问题. 本文采用 AD 公司的 PKD01 峰值保持器采集偏压脉冲峰值,

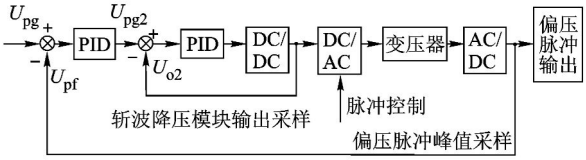


a 频率 10 Hz,占空比 0.5



b 频率 40 Hz,占空比 0.5

图 8 第 1 种偏压脉冲输出波形



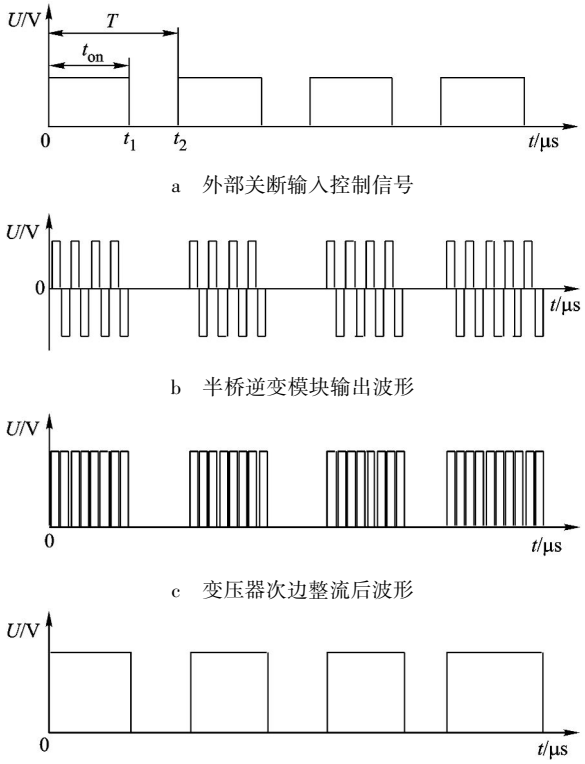
U_{pg}—偏压脉冲峰值给定值;U_{pf}—偏压脉冲峰值反馈值;U_{o2}—斩波降压模块输出电压采样;U_{pg2}—偏压峰值给定值 U_{pg} 和偏压峰值采样值 U_{pf} 比较后 PID 输出的中间值.

图 9 脉冲峰值闭环控制原理图

PKD01 峰值保持器采用跨导型运算放大器,因而具有响应速度快、通频带宽、线性好、峰值保持精度高等优点. 对于具有瞬变峰值脉冲的信号,通过选择适当的外接保持电容,PKD01 即可快速、准确地检测并保持峰值脉冲信号,直至发送 RST 复位信号进行清除为止. 另外,DSP 的 10 位 A/D 转换时间最小为 500 ns,足以对脉冲峰值实现多次定时采样.

半桥逆变模块脉冲发生器采用 PWM 发生器芯片 SG2525,通过控制 SG2525 的外部关断信号输入端(第 10 脚)的开通关断频率实现半桥逆变模块开通关断频率,最终实现偏压脉冲输出. 当 SG2525 的外部关断信号输入端为高电平时,半桥逆变模块的开关管 Q_5 和开关管 Q_6 全部关断,此时偏压脉冲产生电路输出为零;当 SG2525 的外部关断信号输入端为低电平时,开关管 Q_5 和开关管 Q_6 交替开通,此时偏压脉冲产生电路最终输出为固定值;通过控制 SG2525 的外部关断信号输

入端脉冲的频率实现最终的偏压脉冲输出. 工作过程如图 10 所示,其中图 10a 为外部关断输入控制信号,通过一个逻辑电路连接到 SG2525 的第 10 脚,当外部关断输入控制信号为高电平时,SG2525 的第 10 脚为低电平;当外部关断输入控制信号为低电平时,SG2525 的第 10 脚为高电平.



a　外部关断输入控制信号

b　半桥逆变模块输出波形

c　变压器次边整流后波形

d　偏压脉冲电路输出

图 10　第 2 种脉冲产生方式控制原理图

在第 1 个周期内,[0 ~ t_1],外部关断输入信号为高电平,半桥逆变模块正常输出,偏压脉冲输出为直流电压;[t_1 ~ t_2],外部关断输入控制信号为低电平,半桥逆变模块关断输出,偏压脉冲输出为零;在 t_2 以后, 重复上个周期的动作. 从图 10a 中可以看出,外部关断输入信号关断的频率和占空比控制偏压脉冲的频率和占空比.

SG2525 外部关断信号输入端脉冲频率和占空比是通过调节周期寄存器 T1PER 与其比较寄存器 COMPR1 的值完成的,其中在 EVA 选择一路 PWM 输出引脚,由相应的比较控制寄存器 ACTRA 设定为高有效,记为 PWM_n,与该路 PWM 输出相关的另外一路 PWM 不能使用. 根据所设定脉冲频率 f_n 确定事件管理模块周期寄存器 T1PER 中所存的数值 $T_{num} = f_{clk}/f_n$,其中 f_{clk} 为周期寄存器工作的时钟频率,f_n 为逆变器工作频率.

第 2 种脉冲产生方式偏压脉冲输出波形如图 11 所示.

图 11 的具体参数为:脉冲频率为 1 kHz,占空

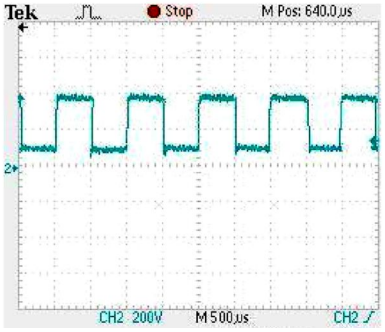


图 11　第 2 种偏压脉冲输出波形

比 50%,脉冲基值 80 V,脉冲峰值 400 V. 从图中可看出,脉冲电子束焊接偏压电源的输出电压稳定,按照设定脉冲频率和占空比变化. 相比在斩波降压模块实现脉冲输出波形畸变小、控制精度高并能够实现更高的脉冲频率.

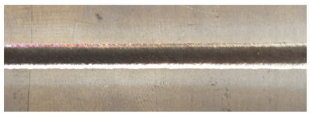
4　试　验

采用脉冲电子束焊接电源对 3 mm 厚度 Ti-6Al-4V 钛合金板进行电子束焊接试验,具体焊接参数如表 1 所示.

表 1　试验用焊接工艺参数

试件	加速电压 U/kV	聚焦电流 I_f/mA	峰值束流 I_p/mA	平均束流 I_a/mA	束流频率 F/Hz	占空比/%	焊接速度 V/(mm·s^{-1})
1	55	710	12	12	直流	直流	6.0
2	55	710	16	8	10	50	6.0
3	55	710	16	8	20	50	6.0
4	55	710	16	8	40	50	6.0
5	55	710	16	8	160	50	6.0

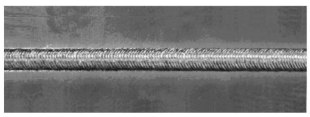
试件 1 连续束流电子束焊接,其它试件为脉冲电子束焊接,焊接均是在保持相同焊透条件下进行. 在脉冲电子束焊接过程中,电子束流是间歇性打在工件上,在脉冲束流的冲击作用下,熔池不断熔化与冷却凝固,随着工件的移动,电子束流在试件上前移,熔池下凹,熔化金属被排斥在电子束前进的后方,冷却凝固后形成一系列弧形纹理. 从图 12 焊缝形貌来看,焊缝上表面宽度一致,弧纹均匀,随着脉冲频率的增加,弧纹间距逐渐减小,脉冲频率 160 Hz 以后已经看不出弧纹间距. 从表 1 可以看出,脉冲电子束焊接的平均束流为 8 mA,小于连续束流焊接的束流 12 mA. 在同样加速电压下脉冲电子束焊接在减少热输入的情况下与连续束流电子束焊接保持同样的焊透性,说明在相同平均输入功率下,相比连续束流电子束焊接,脉冲电子束焊接的冲击作用使得电子束焊接的穿透性更加显著,并且焊缝宽度有减小的趋势.



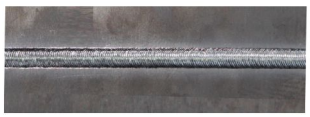
a 试件(直流)



b 试件 2(10 Hz)



c 试件 3(20 Hz)



d 试件 4(40 Hz)



e 试件 5(160 Hz)

图 12 电子束焊缝形貌

5 结 论

本文开发的脉冲电子束焊接偏压电源,能够根据设置的偏压脉冲频率、偏压基值和偏压脉冲峰值得到对应的脉冲束流,经测试脉冲偏压电源具有输出波形稳定、动态响应快、控制精度高和可靠性好等优点.

该电源主电路拓扑能够实现常规连续束流焊接和脉冲束流焊接自由切换,即根据实际需要既能实现连续束流焊接,又能实现脉冲电子束焊接.

利用开发的脉冲电子束偏压电源组成的脉冲电子束焊接电源对 Ti-6Al-4V 钛合金板进行脉冲电子束焊接,并和连续束流电子束焊接对比. 试验证明在相同平均功率下,脉冲电子束焊接比连续束流电子束焊接的穿透性更加显著,并且焊缝宽度有减小的趋势.

参考文献 (References)

[1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册[M]. 北京:机械工业出版社,2007:657
China Mechanical Engineering Society Welding Branch. Welding handbook[M]. Beijing: Engineering Industry Press, 2007: 657 (in Chinese)

[2] 张洪波,刘方军,左从进. 一种新型脉冲电子束焊接用 PWM 逆变式栅偏压电源系统设计[J]. 航空制造技术,2004(增刊):188 - 191
Zhang Hongbo, Liu Fangjun, Zuo Congjin. Design of a pulsed gridbias supply with PWM in verter for pulsed electron beam welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004 (Supplement): 188 - 191 (in Chinese)

[3] Schultz H. Electron beam welding[M]. Abington: Abington Publishing, 1994: 38

[4] 丘成茂. 电子束焊接获得深焊效应的机理和方法[J]. 电工电能新技术,1994:1 - 10
Qiu Chengmao. The deep penetration welding principle and method of electron beam welding[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1994: 1 - 10 (in Chinese)

[5] American Welding Society. Recommended practices for electron beam welding[M]. Miami: Global Engineering Documents, 1999

[6] 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)