

DOI: 10.3901/JME.2023.02.096

全数字大功率交流脉冲埋弧焊接电源^{*}

王振民^{1,2} 唐嘉健¹ 潘晓浩³ 饶 杰¹ 林三宝² 徐孟嘉^{1,2}

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640;

2. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 哈尔滨 150001;

3. 北京时代科技股份有限公司 北京 100094)

摘要: 为改善埋弧焊的焊接质量, 结合脉冲焊接和交流焊接两者优势, 提出一种交流脉冲埋弧焊焊接方法, 并研制了一台大功率交流脉冲埋弧焊电源。功率变换电路采用双主电路并联设计, 可实现 1 250 A 交流脉冲电流输出; 主电路次级采用耦合电感结构, 加快交流过零点速度并提高极性切换时的电弧稳定性; 搭建了以 STM32F405RGT6 芯片为核心的数字化控制系统, 通过多特性数字均流策略实现了双主电路的可靠均流和多种电流波形的平稳输出, 采用分离式增量 PID 算法进一步提升动态响应性能。工艺试验结果表明, 在同等的焊接条件和交流参数下, 交流脉冲埋弧焊比交流方波埋弧焊可获得更深的熔深、更宽的熔宽以及更细化的焊缝晶粒。

关键词: 埋弧焊; 交流脉冲; 数字化; 多路均流

中图分类号: TG439

Digital High-power AC-Pulse Submerged Arc Welding Power Source

WANG Zhenmin^{1,2} TANG Jiajian¹ PAN Xiaohao³ RAO Jie¹ LIN Sanbao² XU Mengjia^{1,2}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510640;

2. School of State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

3. Beijing Times Technology Corporation Limited, Beijing 100094)

Abstract: In order to improve the welding quality of submerged arc welding, combining the advantages of pulse welding and AC welding, a welding method of AC-Pulse submerged arc welding is proposed, and a high-power AC-Pulse submerged arc welding power source is developed. The power conversion circuit is designed in parallel with two main circuits, which can achieve 1250A AC pulse current output. The secondary circuit adopts coupling inductance structure to accelerate the speed of AC zero-crossing and improve the stability during polarity switching. A digital control system with STM32F405RGT6 chip as the core is built. Through the multi-characteristic digital current sharing strategy, the reliable current sharing of dual main circuits and the stable output of various current waveforms are realized. The discrete incremental PID algorithm is used to improve the dynamic response performance. The process test results show that under the same welding conditions and AC parameters, compared with AC square wave submerged arc welding, AC-Pulse submerged arc welding can obtain larger weld depth and weld width and smaller weld grains.

Key words: submerged arc welding; variable polarity pulse; digital welding power source; multi-channel current sharing

^{*} 国家自然科学基金(51875212)、广州市国际合作(201807010035, 2019070110006)、深圳市技术攻关(JSGG20191118102201716, JSGG20191129094612348)和先进焊接与连接国家重点实验室开放课题(AWJ21Z03)资助项目。20210925 收到初稿, 20220521 收到修改稿

0 前言

埋弧焊因其成熟的工艺方法和高效、自动化的优势而广泛应用于中/厚大构件的焊接。为提高生产效率,埋弧焊往往采用大电流、高速度的焊接工艺参数,不仅增加了电弧偏吹、焊缝咬边等风险,还会因焊接热输入过大导致焊接接头出现晶粒粗化现象,致使焊缝力学性能下降^[1]。交流焊接可有效削弱电弧受磁场的影响,抑制电弧磁偏吹,减少焊缝气孔并改善焊缝成形质量^[2-3]。而脉冲焊接可有效控制焊接热输入量,并能振荡熔池,从而有利于减少焊缝气孔并细化晶粒,改善焊缝的力学性能^[4-5]。因此,为提升埋弧焊的焊接质量,可以将交流焊接和脉冲焊接的优势相结合,形成交流脉冲埋弧焊新工艺。但由于埋弧焊焊接电流非常大,在大电流下实现交流脉冲波形对于焊接电源的极性切换速度、过零点稳弧能力以及动态调控特性等均有着极高的要求。

针对上述问题,研制了一台全数字大功率交流脉冲埋弧焊接电源。该电源采用双主电路并联结构,结合多特性数字均流技术,可实现 1 250 A 的额定电流平稳输出;以数字化波形控制为基础,结合改进后的 PID 算法,并搭配耦合滤波电感的硬件结构,可实现多种电流波形的柔性输出和精密控制;交流脉冲极性切换快,过零点时间短,电弧稳定,可满足交流脉冲焊接新工艺的需求。

1 系统硬件设计

1.1 焊接电源总体设计

交流脉冲埋弧焊电源主要包括功率变换电路、主控制电路和人机交互面板三个功能模块。功率变换电路借助前后级双逆变拓扑实现波形调控,并通过双路并联的方式增大焊接电源的功率容量。主控制电路以 STM32F405RGT6 微控制器为核心,其优异的性能和丰富的外设可满足焊接电源复杂精细的控制要求,实现双主电路多系统的协同控制。人机交互面板以 ARM 芯片为核心,搭配相应的外围电路可满足多参数的调节、存储、显示以及与外部系统通信的功能。各模块之间的关系如图 1 所示。

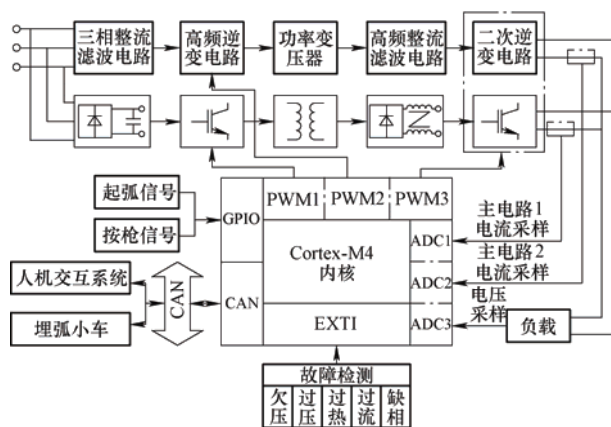


图 1 交流脉冲埋弧焊电源总体框图

1.2 功率变换电路设计

为提升埋弧焊接电源的功率容量,功率变换电路由两路一致的主电路并联而成,单路主电路具有 630 A 的输出电流容量,设备总输出功率可达 60 kW。

因为输出电流大,变极性时电流跨度极大,因此极性切换时存在较长的过零时间,并存在较大过零熄弧的可能。为解决该问题,设计了如图 2 所示带有耦合电感的次级电路拓扑结构。双路半波整流配合半桥逆变可实现变极性输出。高频整流后级采用耦合电感 L1a、L1b 进行输出滤波,在变极性输出时,因正负电流通道的电流方向与对应的电感同名端同向,因此无论输出何种极性均可在耦合电感磁芯中形成同向磁场。恒流输出时耦合电感起平滑滤波作用;变极性输出时耦合电感可实现无缝续流,从而加快极性切换的速度,提高变极性输出时的输出效率^[6]。当变极性输出电流过零点出现断弧时,电流迅速下降,耦合电感产生极大的感应电压协助重新起弧,因此可显著提升电弧过零点时的稳定性。

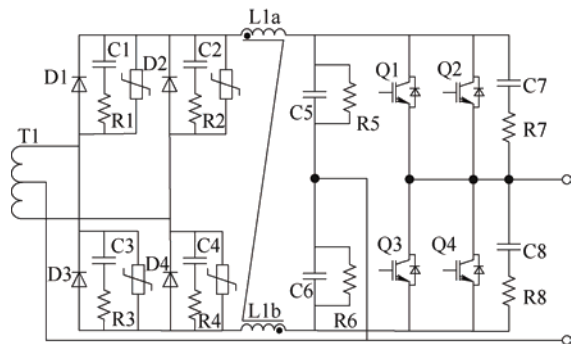


图 2 次级电路拓扑结构

为进一步加快极性切换速度,输出时次级电路应时刻存在一条导通回路,减少电流的衰减。但由于 IGBT 的开关延时,即使次级逆变驱动信号不存

在死区时间, 极性切换时仍存在短暂的区间次级 IGBT 均处于高阻态, 致使电流快速衰减。通过增大 IGBT 的栅极关断电阻, 适当延缓 IGBT 的关断速度, 可保障电流在极性切换期间不会快速衰减, 加快极性切换的速度, 同时还能减小正常焊接时电流快速变化产生的感应电压, 降低 IGBT 两端的电压应力提高设备寿命。

1.3 数字化控制系统设计

STM32F405RGT6 芯片工作频率可达 168 MHz, 数据处理速度高达 1.25DMIPS/MHz, 并集成了丰富的外设, 可满足焊接电源复杂的多模块协调控制; 同时该芯片整合了 DSP 和 FPU 单元, 浮点数运算能力大大增强, 具有应用一定复杂度的数字控制算法的能力^[7-8]。如图 1 所示, 所研制的焊接电源硬件控制系统以 STM32F405RGT6 微处理器为核心, 搭建了采样反馈、驱动控制、故障检测、系统通讯等系列外围电路, 协同控制焊接系统中各个功能模块。

ADC 采样反馈整合了电压跟随、巴特沃斯滤波和绝对值电路, 可确保输出采样值的实时性和有效性; 故障检测模块包括过热故障检测、三相缺相检测、过压欠压检测、IGBT 退饱和检测等多个检测模块, 结合 MCU 的外部中断模式和高速处理能力, 实时保障焊接电源的工作安全; PWM 驱动信号由 MCU 产生, 经达林顿管组和高速光耦隔离放大传输至驱动模块实时控制 IGBT 的开关工作; 人机交互系统采用 TM1650 芯片控制数值显示, TM1650 与交互系统 MCU 之间通过 IIC 通信实现数据交换; 主控系统、人机交互系统和埋弧小车都挂载在同一 CAN 差分总线上, 筛选器采用 16 位掩码模式, 通信速率设为 1 Mb/s, 实现三个子系统间的协调配合工作。

2 控制软件设计

2.1 焊接流程任务设计

焊接电源通过多任务划分实现对焊接流程的控制, 其中包括按枪检测、参数设定、焊接执行、故障检测四个任务。如图 3 所示, 四个任务并行运行, 由 RTOS 实时内核和中断配置宏观调度。按枪检测实时控制焊接执行任务的开始和停止; 参数设定用于实时接收设定来自于人机交互面板的焊接参数; 焊接执行在按枪按下后根据参数设定控制整个焊接工作流程; 故障检测在判断故障发生时即刻关断输出保护设备^[9]。其中焊接执行是焊接流程任务中的核心, 实现对电流波形的输出调控。

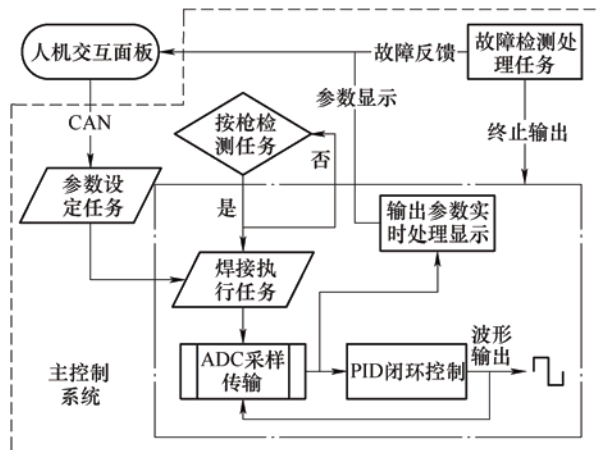


图 3 焊接任务示意图

不同焊接模式均对应着特定的波形控制流程。在交流脉冲模式中, 由于交流频率与脉冲频率不一致, 需要两个定时器分别计时实现对输出电流的控制。每一次脉冲计时完成更新预期的电流参数, 每一次交流计时完成触发一次极性切换和输出目标值更改。如图 4 所示, 引弧成功后初始进入正向峰值阶段, 脉冲峰值计时开始, 同时开始交流正向计时, 正向计时完成后切换目标值和输出极性进入反向峰值阶段, 并开始交流反向计时, 如此循环, 直至脉冲峰值计时完成进入脉冲基值环节; 此时交流正向阶段输出正向基值, 正向计时完成进入反向峰值阶段, 如此反复; 直至关闭按枪开关, 进入回烧阶段, 焊接完成。

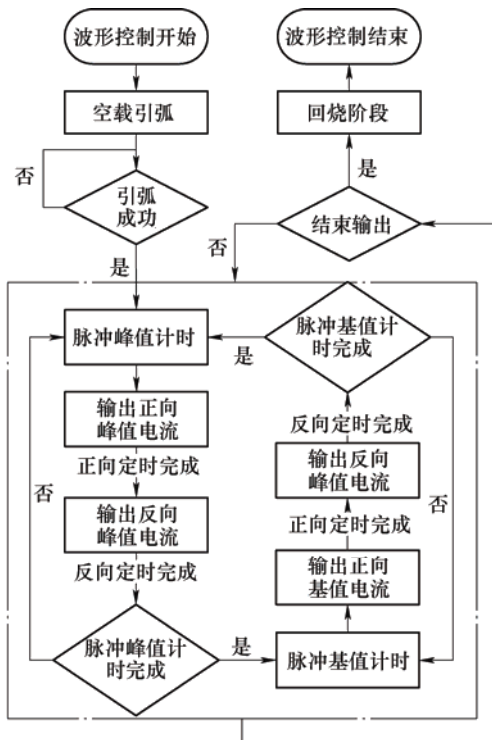


图 4 交流脉冲波形控制

2.2 分离式增量 PID 算法

焊接执行任务中的波形控制程序完成了对输出波形极性切换和目标值设定的控制，PID 算法则根据所设定目标值对输出电流进行闭环调控。由于焊接电源电气回路中存在着大量的寄生参数和潜在回路，交流脉冲波形波动幅值大且频繁，极易造成超调、波动、稳态误差等波形畸变。传统 PID 无法处理复杂、快速的波形调控，而改进后的分离式增量 PID 则能够良好地契合工艺实现对输出电流的精密调控。

将基本 PID(式(1))离散化，并将相邻采样点相减得增量式 PID(式(2))。增量式 PID 计算复杂度低，可以良好地应用于微处理器上，提高计算速度。

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

$$\Delta u_k = K_p(e_k - e_{k-1}) + K_I e_k + K_D(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \quad (2)$$

结合焊接电源，采用增量式 PID 进行 PWM 输出调控时，将本次占空比的计算增量与上一次的控制量累加所得值即为本次初级逆变的占空比设定值。

由式(2)可知， I 分量(积分)将系统输出误差不断累积以消除静态误差。在交流脉冲输出时，输出目标值变化频繁， I 分量误差持续累积，必定会造成严重超调并引起后续的波形振荡。为抑制输出超调，在式(2)的基础上引入积分分离的方式，在大误差阶段暂停积分，减少不必要的误差累积；较小误差阶段恢复积分，抑制稳态误差的出现。

但是积分量减小将导致系统输出的响应速度较大幅度地减慢。为加快响应速度，在上述的基础上进一步引入比例分离的方式。电流目标值切换瞬间，可获得一个极大的当前误差值 e_k ，随着电流值接近目标值，当前误差值逐步减小。根据式(2)可知， P 增量与误差增量成正比，因此仅在电流目标值切换瞬间可获得一个极大的同向 P 增量，后续 P 增量均为反向。根据该特点将 P 分量与 I 分量相匹配，得区间公式

$$\begin{cases} K_p = P_1 & K_I = I & 0 \leq |e_k| < \varepsilon_1 \\ K_p = P_2 & K_I = I & \varepsilon_1 \leq |e_k| < \varepsilon_2 \\ K_p = P_3 & K_I = 0^+ & \varepsilon_2 \leq |e_k| \\ P_2 > P_3 > P_1 \end{cases} \quad (3)$$

在大误差区间采用大的 P 值加快系统的调控速度；较小误差阶段进一步增大 P 值以快速消除 P 值的影响，依靠积分逐步接近稳态值；稳态阶段大幅

减小 P 值精细化调控输出波形，减小振荡发生的可能。

结合实际焊接电源的闭环调控模式，在软件 SIMULINK 中根据经典 PID 和分离式增量 PID 分别建立了两个仿真系统。表 1 为阶跃 600 A 下对两个系统测得的动态性能指标参数，对比可发现分离式增量 PID 系统的电流上升速度虽略慢于经典 PID 系统，但调节速度更快，可在更短的时间内达到稳态；并且有着极其优异的输出超调抑制效果，输出超调量约为经典 PID 系统的 1/4。

表 1 阶跃输出动态性能指标

指标	经典 PID 系统	分离式增量 PID 系统
超调量 $\sigma(\%)$	39.7	10.2
上升时间 t_r/ms	2.291	2.488
调节时间 t_s/ms	10	9.377
稳态误差 e_{ss}/A	0	0

2.3 多路均流策略

功率变换电路并联的两路主电路因硬件品质和接线上存在微小的差异，在同种输入条件下容易出现电流不均的现象，引起故障。为尽可能消除并联主电路间的电流差异，所研制的焊接电源每一路主电路如图 1 所示均有着独立的电流环。采用双闭环自主调控策略，当恒压输出时，如图 5 所示，外环采用电压 PID 闭环实时更新电流给定值调节输出电压，内环通过将电流给定值平均分配给各路独立的电流环，保证输出电压可控的同时各路电流近乎相等；动态输出时，输出电流的目标值和极性实时改变，结合波形控制程序和双路自主 PID 闭环调控策略协同控制每一路的输出电流波形。

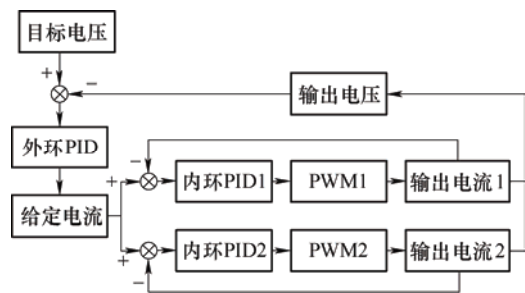


图 5 恒压均流策略

3 整机性能测试

试验平台由研制的焊接电源、大功率模拟负载、力科 HDO4104 示波器、电压电流探头等设备组成。

3.1 焊接电源外特性测试

所研制的大功率交流脉冲埋弧焊接电源在直流输出模式下测得电源外特性曲线如图 6 所示, 在额定电流 1 250 A 以内可实现恒流陡降特性, 输出功率可达 60 kW。

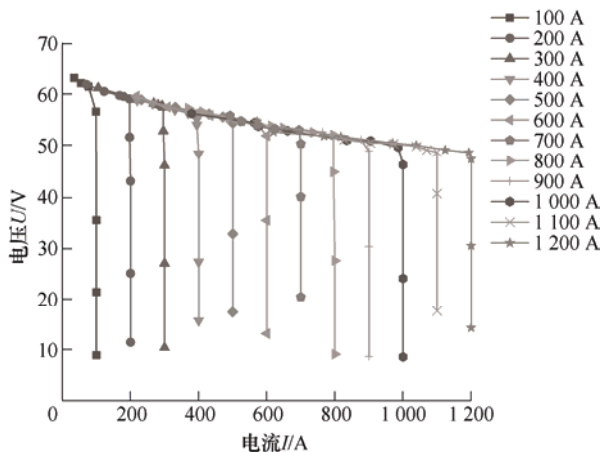


图 6 外特性曲线

3.2 效率测试

图 7 是根据恒流输出时的三相输入功率以及输出电流电压值计算绘制而成的效率曲线, 可发现输出效率在 35 kW 附近达到最大值, 最高输出效率为 90.46%。

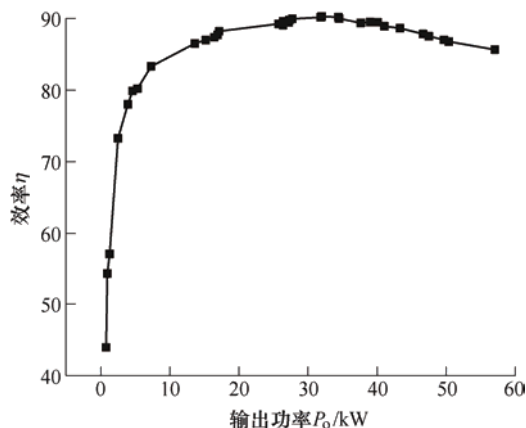


图 7 效率曲线

3.3 焊接电源波形测试

所研制的大功率交流脉冲埋弧焊接电源可输出多种功能波形, 其中图 8 所示波形分别为恒流、恒压、交流方波、交流脉冲四种工作模式下的实测波形。

图 8a 为恒流 1 200 A 下测得的两路并联主电路电流输出波形, 电流波动较小, 实测电压平均值 41 V, C1 电流均值为 600.1 A, C2 电流均值为 597.6 A, 输出总电流均值为 1 197.6 A, 均流不平衡度 0.2%。图 8b 的 C1 曲线为恒压 30 V 下测得的电压输出波形, 实测电压平均值 30.18 V; C2、C3 曲线为恒压 30 V 下测得的两路并联主电路电流输出波

形, C2 电流均值为 426.4 A, C3 电流均值为 425.7 A, 均流不平衡度 0.08%。由实测结果可知, 所研制的焊接电源静态均流能力优异, 大负载下输出稳定, 稳态误差小, 输出精度高。

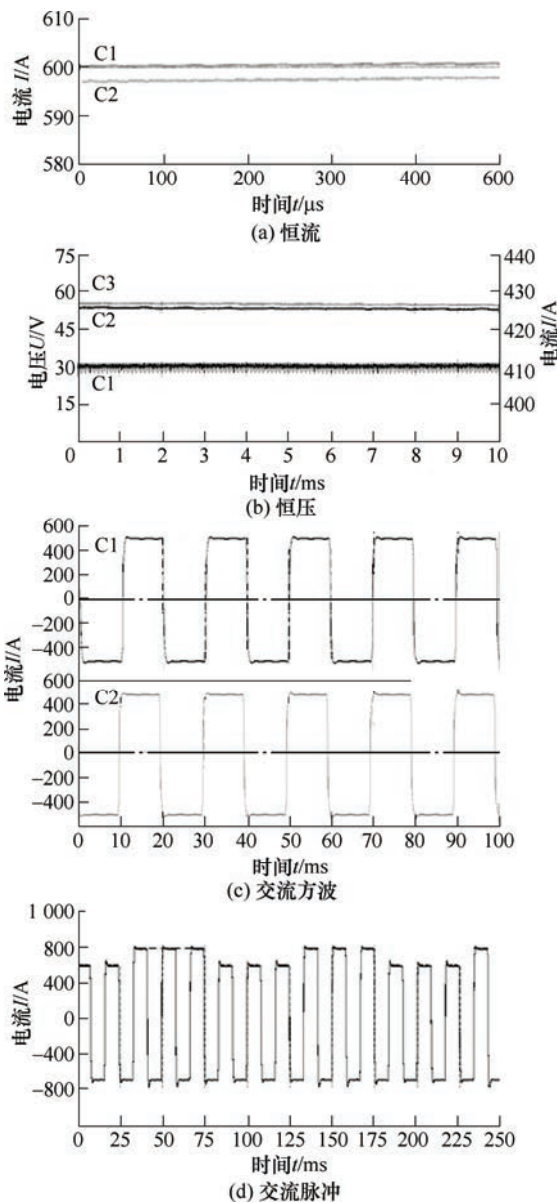


图 8 焊接电源输出波形

图 8c 的 C1、C2 曲线分别为交流方波模式下测得的两路并联主电路电流输出波形, 设定正向峰值 1 000 A、反向峰值 1 000 A、交流频率 50 Hz、交流占空比 50%, 实测双路波形极性同步且一致性高, 正反向切换时间为 452 μs, 单路最大超调 10 A。图 8d 为交流脉冲模式下测得的电流输出波形, 设定正向峰值 800 A、正向基值 600 A、反向 700 A、交流频率 60 Hz、脉冲频率 10 Hz, 实测波形与设定值一致性高。根据实测结果可知, 动态波形调控配合双路自主 PID 闭环策略可获得优良动态均流效果; 交流 ±1 000 A 切换速度快达 4.4 A/μs, 耦合电感结合次

级延迟关断策略可有效加快极性切换的速度；分离式增量 PID 算法下的交流方波和交流脉冲波形超调小、稳态误差极小、无明显振荡，动特性表现优异。

4 焊接工艺试验

焊接试验平台由所研制的焊接电源样机、埋弧

小车以及焊剂焊丝等构成。为探究在交流埋弧焊中加入脉冲对焊缝成型的影响，设置了三组对照试验，第一组为交流方波焊，第二、三组为脉冲频率不同的交流脉冲焊，三组焊接试验的输出参数设定值如表 2 所示。试验均采用 3.2 mm 的 H08A 焊丝、HJ431 焊剂，焊接试板为 Q235F 沸腾钢、板厚 8 mm，埋弧小车行走速度 54 cm/min，输出电压 32 V。

表 2 焊接参数设定值

序号	交流参数				脉冲参数			电流有效值/A
	正向峰值/A	反向峰值/A	频率/Hz	占空比(%)	正向基值/A	频率/Hz	占空比(%)	
1	550	500	30	70	—	0	—	535
2	550	500	30	70	525	5	50	526
3	550	500	30	70	525	15	50	526

从三组试验焊缝中切取部分磨抛制样，并用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀，在金相显微镜下拍摄得到图 9 所示的宏观组织。其中图 9a、图 9b、图 9c 分别对

应试验 1、2、3 三组试验，测得焊缝试样截面宏观数据如表 2 所示。由表 3 可发现，焊缝熔深有试验 3(15 Hz)>试验 2(5 Hz)>试验 1(无脉冲)，焊缝熔宽有试验 2(5 Hz)>试验 3(15 Hz)>试验 1(无脉冲)。根据表 1 可知，在同样的交流参数下，交流脉冲焊热输入能量(电流有效值)均略低于交流方波焊^[10-12]。结合表 2、表 3 可得出如下结论：在一定的低频脉冲频率内，交流脉冲焊焊缝的熔深随脉冲频率的提高而增加，并且交流脉冲焊的熔宽和熔深均大于同等交流参数下的交流方波焊焊缝的熔宽和熔深。

表 3 不同脉冲频率下焊缝截面尺寸

序号	熔深/mm	熔宽/mm	余高/mm
1	5.36	22.18	1.45
2	5.50	22.86	1.77
3	5.54	22.68	1.54

图 10a、10b、10c 分别为试验 1、2、3 三组试验试样熔合线附近显微组织。三组试样过热影响区中均分布有块状的魏氏组织，其脆性大，粗大的魏氏组织可能会对焊缝的塑性和冲击韧性造成不良影响。观察可发现图 10a 中的魏氏组织粗大且分布较广，图 10b 与图 10c 中的魏氏组织则相对较小，因此认为在低碳钢埋弧焊时在交流方波中加入脉冲电流有助于抑制魏氏组织的生长。

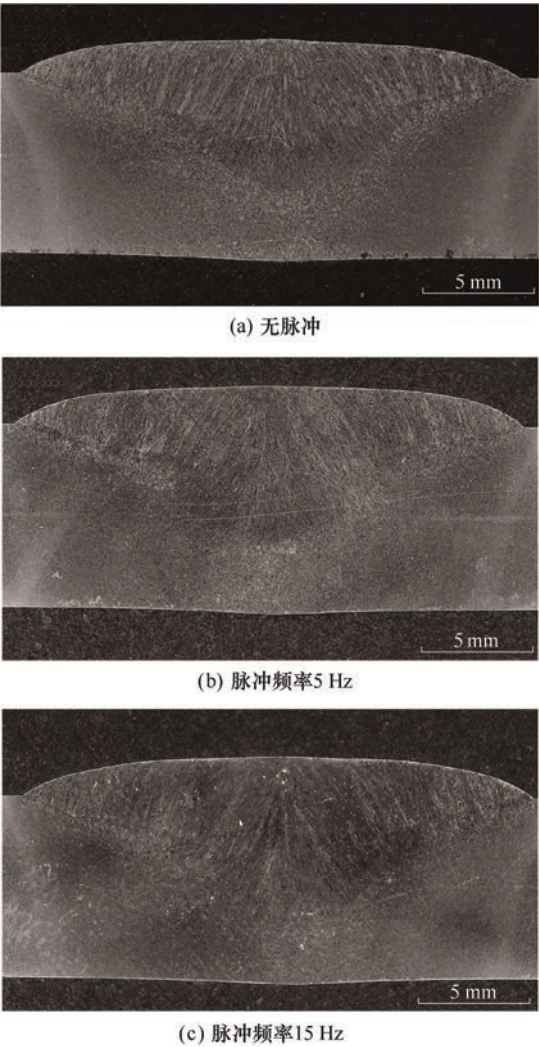


图 9 焊缝截面宏观组织

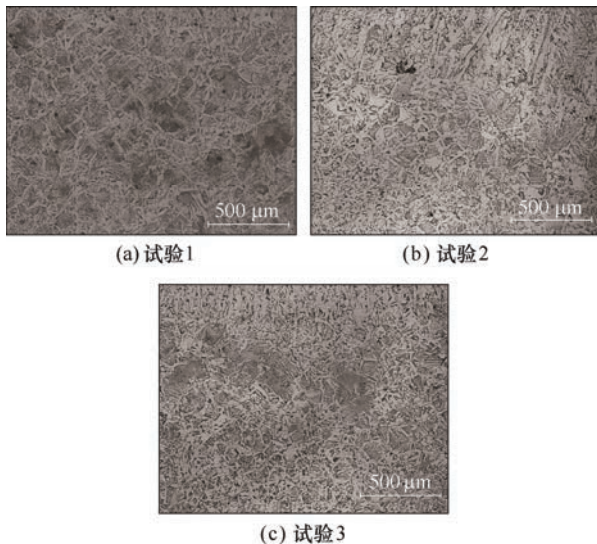


图 10 焊缝截面金相显微组织

5 结论

(1) 采用双路并联双逆变拓扑结构, 以 Cortex-M4 内核的 ARM 处理器为控制核心, 成功研制一台输出电流达 1 250 A 的全数字化大功率交流脉冲埋弧焊接电源。

(2) 研制的样机能效可高达 90% 以上, 直流 1 200 A 下均流不平衡度仅为 0.2%, $\pm 1\ 000$ A 切换时间仅用 452 μs , 动特性优异; 可稳定精确输出直流、直流脉冲、交流、交流脉冲等多种电流波形。

(3) 在同样的焊接条件和交流参数下, 交流脉冲焊可比交流方波焊获得更大的熔深和熔宽, 焊缝晶粒组织更为细化, 在提升焊接效率的同时改善了焊缝质量。

参 考 文 献

- [1] AHMAD M A, SHEIKH A K, NAZIR K. Design of experiment based statistical approaches to optimize submerged arc welding process parameters[J]. ISA Transactions, 2019, 94: 307-315.
- [2] LI K, WU Z, ZHU Y, et al. Metal transfer in submerged arc welding[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2017, 244: 314-319.
- [3] 孙咸. 极性对埋弧焊工艺质量的影响[J]. 电焊机, 2018, 48(5): 1-8.
SUN Xian. Influence of electrode polarity on the usability quality of submerged arc welding[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(5): 1-8.
- [4] 王占英, 李桓, 梁建明, 等. 脉冲埋弧焊接头力学性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 107-110.
- WANG Zhanying, LI Huan, LIANG Jianming, et al. Analysis of mechanical properties of pulse submerged arc welding joint[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2009, 30(2): 107-110.
- [5] WANG Zhenmin, JIANG Donghang, WU Jianwen, et al. A review on high-frequency pulsed arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60: 503-519.
- [6] 齐铂金, 王义朋, 王曲. 快变换交流方波埋弧焊电源研制[J]. 航空制造技术, 2016(17): 67-70, 76.
QI Bojin, QANG Yipeng, WANG Qu. Study on submerged arc welding power source with high commutation rate AC square-wave[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(17): 67-70, 76.
- [7] 钟启明, 谢芳祥, 王振民. 新型双脉冲 MIG 焊接电源[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 94-99.
ZHONG Qiming, XIE Fangxiang, WANG Zhenmin. New double pulse MIG welding power source[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2019, 40(7): 94-99.
- [8] 王振民, 张福彪, 王鹏飞, 等. 全数字机器人 VPPA 焊接电源[J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 5-8.
WANG Zhenmin, ZHANG Fubiao, WANG Pengfei, et al. Digital robot VPPA welding power supply[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2017, 38(7): 5-8.
- [9] 黄石生, 何宽芳, 孙德一, 等. 数字化控制的埋弧自动焊装备的研制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(8): 69-74.
HUANG Shisheng, HE Kuangfang, SUN Deyi, et al. Development of automatic submerged arc welding equipment with digital control[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2008, 36(8): 69-74.
- [10] CHO D W, SONG W H, CHO M H, et al. Analysis of submerged arc welding process by three-dimensional computational fluid dynamics simulations[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2013, 213(12): 2278-2291.
- [11] MENDEZ P F, GOETT G, GUEST S D. High speed video of metal transfer in submerged arc welding[J]. Welding Journal, 2015, 94(10): 326-333.
- [12] 王朋, 刘霞, 芦凤桂. 深窄间隙焊接技术在大厚度构件材料焊接中的应用研究[J]. 机械工程学报,

2016, 52(2): 56-61.

WANG Peng, LIU Xia, LU Fenggui. Application of deep-narrow gap welding method in manufacturing component with heavy section[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 56-61.

- [13] SRIDHAR P V S S, BISWAS P, MAHANTA P. Influence of welding current on bead profile and mechanical properties of double sided submerged arc welding of AISI

304 austenitic stainless steel[J]. Materials Today : Proceedings, 2019, 19: 831-836.

作者简介: 王振民, 男, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接电源及其智能控制。

E-mail: wangzhm@scut.edu.cn

徐孟嘉(通信作者), 女, 1984 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为先进焊接工艺。

E-mail: xumj@scut.edu.cn



(上接第 95 页)

plasticity and its application to springback simulation[J]. Key Engineering Materials, 2003, 457(233-236): 47-58.

- [26] CHUNG K, LEE M, KIM D, et al. Springback evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non quadratic anisotropic yield functions, part I: Theory and formulation[J]. International Journal of Plasticity, 2005, 21(5): 861-882.

- [27] CHOI Y, HAN C S, LEE J K, et al. Modeling multi-axial deformation of planar anisotropic elastic-plastic materials, part I: Theory[J]. International Journal of

Plasticity, 2006, 22(9): 1745-1764.

- [28] LEE M, KIM D, KIM C, et al. A practical two surface plasticity model and its application to spring-back prediction[J]. International Journal of Plasticity, 2007, 23(7): 1189-1212.

作者简介: 段永川, 男, 1983 年出生, 博士研究生导师。主要研究方向为板材塑性及断裂行为识别。

E-mail: yongchuan.duan@ysu.edu.cn

张芳芳(通信作者), 女, 1984 年出生, 博士, 硕士研究生导师。主要研究方向为复合材料损伤行为优化识别方法。

E-mail: fangfang.zhang@ysu.edu.cn