DOI: 10.3901/JME.2020.06.102

钛合金快频脉冲柔性波形调制 TIG 焊接工艺*

吴健文 徐孟嘉 范文艳 陈浩宇 江东航 王振民
(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640)

摘要: 基于自主研发的 SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源系统, 提出一种钛合金“快频脉冲柔性波形调制”TIG 焊接技术。快频脉冲焊接电源采用 SiC MOSFET 作为逆变功率器件, 大幅提高电源的逆变频率和动态响应特性, 加强高频段电弧控制效果, 实现了 20 kHz 规整快频脉冲柔性电流波形的稳定输出。将快频脉冲柔性波形调制 TIG 焊技术应用于钛合金 TC4 焊接过程, 研究表明: 与传统脉冲 TIG 焊对比, 快频脉冲柔性波形 TIG 电弧收缩效果明显, 电弧径向尺寸显著减小; 快频脉冲柔性波形调制 TIG 焊技术具有显著的细化焊缝晶粒和减少热影响区粗化的效果, 钛合金焊缝晶粒尺寸减小了约 71%。

关键词: 快频脉冲焊接; 焊接波形控制; 钛合金; SiC MOSFET

中图分类号: TG439

Flexible Waveform Interpulse TIG Welding for Titanium Alloy

WU Jianwen XU Mengjia FAN Wenyan CHEN Haoyu JIANG Donghang WANG Zhenmin
(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: Based on the self-developed SiC MOSFET interpulse welding power supply system, a novel flexible waveform interpulse welding technology is proposed. The SiC MOSFET is used as the inverter power device, which improves the inverter frequency and the dynamic response of the power supply. The interpulse welding power supply enhances the control effect of high-frequency arc to reach high stability in output of the regular and flexible current waveform of the interpulse at 20 kHz. The method is applied to the welding of titanium alloy TC4. Compared with the conventional pulsed TIG, the arc radial dimension of the interpulse TIG is reduced, and the grains in the fusion zone and HAZ of the weld are significantly refined. The average grain size in the fusion zone is decreased by 71%.

Key words: interpulse welding; welding waveform control; titanium alloy; SiC MOSFET

0 前言

脉冲钨极惰性气体保护电弧(Tungsten inert gas, TIG)焊以电弧稳定、零飞溅、焊接质量高、可焊金属范围广的优势受到广泛应用^[1-3], 但传统脉冲 TIG 焊的脉冲频率低, 电弧能量不够集中, 热输入量较大, 导致 TIG 钛合金焊件普遍存在接头晶粒粗大和组织不均匀等问题。为此, 钛合金普遍采用具有能量密度高、热输入量小、热影响区小、焊接接头变形小等优点的电子束焊及激光焊^[4-7]。有研究表明, 在自由电弧的基础上加入高频脉冲电流可提高电弧稳定性, 高频周期性变化的电弧压力对熔池的搅拌作

用能够破碎枝晶, 促进钛合金 TC4 焊接接头的细化晶粒^[8-11]。相关研究人员提出了快频脉冲焊接方法^[12-13]。快频脉冲电流产生的电磁场对电弧进行压缩, 可形成与电子束焊类似的高功率密度电弧^[14-17], 改善电弧能量密度和提高电弧挺度, 控制焊接过程热输入量, 减低热量影响区而提高焊接质量^[18]。和电子束焊相比, 快频脉冲 TIG 焊具有电弧稳定、对设备要求与成本更低、适应性更广、基体金属合金元素不易氧化烧损等优点, 在很多情况下可以取代电子束焊接^[19]。文献[20-21]在直流基值电流上叠加超声频脉冲(10~80 kHz), 用于钛合金 TC4 的 TIG 焊接, 实现了接头组织细化和力学性能的提升。

在快频脉冲焊接电源系统中, 焊接电源的质量与焊接电弧的性能密切相关, 其不仅要精确地为焊接过程提供能量, 还需与系统其他设备可靠协同运行。目前, 快频脉冲焊接电源普遍采用 Si 基绝缘栅双极型晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)

* 国家自然科学基金(51875212)、广东省科技计划(2018A030313192, 2019B090919002)和广州市国际合作(201807010035, 2019070110006)资助项目。20190927 收到初稿, 20200117 收到修改稿

作为主功率器件^[22], 而 Si 基功率器件的开关性能已接近由其材料性能所决定的理论极限, 在一定程度上制约了焊接电源逆变频率、响应速度等几个影响快频脉冲波形调制可靠性的关键指标。另外, 由于在快频脉冲波形调制过程加入了高频脉冲电流的调制, 会对焊接电源产生强烈电磁干扰, 易出现焊接电流不稳定、高频段电弧控制效果差等问题。

近年来, 第三代宽禁带 SiC 功率器件得到了长足发展, 主要性能指标均已远超传统 Si 基功率器件^[23-27]。采用 SiC 功率器件, 可将快频脉冲焊接电源的逆变频率提高至 100 kHz 以上, 有利于提升快频焊接电源的稳定性和可靠性。本文采用 1 700 V SiC MOSFETs (C3M0065100K) 构成全桥逆变电路结构, 研制了一套逆变频率为 100 kHz 的 SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源, 可稳定输出 20 kHz 规整快频脉冲电流波形; 通过柔性波形调制加强高频段电弧控制效果, 实现快频脉冲柔性波形调制的 TIG 焊技术; 在此基础上, 将该技术应用于钛合金 TC4 的焊接过程, 研究了该方法对钛合金焊接的电弧形态和焊缝微观组织的影响。

1 试验方法

1.1 SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源

为获得高功率密度、高频高压、高响应速度以及稳定的高频脉冲电流输出波形, 快频脉冲焊接电源采用双直流电源并联斩波式拓扑结构, 如图 1 所示。快频脉冲焊接电源包括脉冲电流主电路和高频电流调制电路等两路主电路, 均由整流滤波电路、全桥逆变电路、高频变压器和全桥整流电路组成。

图 1 SiC MOSFET 快频脉冲柔性波形调制电源结构

SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源高低频能量变换与复合关键在于高频电流调制电路。现有脉冲电流调制电路常采用单一功率开关管并联在电源输出端的拓扑结构, 由于焊接电源电弧负载的阻抗要小于并联 IGBT 的内阻, 因此在并联 IGBT 导通的同时仍有一部分输出电流流入电弧负载, 无法输出规整的快频脉冲电流波形。本电源采用互锁型拓扑结构来解决高频电流调制难题。如图 1 所示, 并联 IGBT 导通时, 输出回路上串联的 IGBT 关断, 阻止输出电流流入电弧负载; 输出回路中的并联 IGBT 与串联 IGBT 相互制约, 交替开关, 确保脉冲电流主电路输出电流全部经由并联 IGBT 从电源正极流回负极。两个互锁的功率开关管 IGBT 以 20 kHz 或更高的频率交替开关, 实现高频脉冲电流输出。

SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源的主电路拓扑如图 2 所示, 主要包括整流滤波电路、全桥逆变电路、高频变压器和全波整流电路。SiC MOSFET 功率开关管 $Q_1 \sim Q_4$ 组成全桥逆变电路, $D_1 \sim D_4$ 分别是 SiC MOSFET 功率开关管 $Q_1 \sim Q_4$ 对应的体二极管, $C_1 \sim C_4$ 分别是 SiC MOSFET 功率开关管寄生输出电容与外接电容之和, C_b 为加在高频变压器原边侧的隔直电容。全桥逆变主电路将整流滤波后的直流电逆变为高频直流电, 逆变频率为 100 kHz。SiC 肖特基二极管 $VD_1 \sim VD_2$ 组成全波整流电路, L_{o1} 为大功率输出滤波电感。

图 2 SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源主电路拓扑结构图

SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源存在的干扰因素多, 控制难度大, 需要高性能的数字化控制系统进行精细化控制。目前焊接电源普遍采用模拟控制或者基于普通微处理器的简单数字控制, 难以实现快频脉冲柔性波形调制 TIG 焊接过程精细化控制, 影响了焊接质量的进一步提高。因此, 需要一套适用于 SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源的控制系统, 该系统具备主电路脉冲宽度调制 (Pulse width modulation, PWM) 信号输出控制、电信号 ADC 采集与反馈处理、驱动控制等方面的功能。

SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源控制系统总体框图设计如图 3 所示。控制系统包括 ARM 最小控

制系统、驱动电路、电信号 ADC 采样反馈电路、通信、接口电路等。为了实现精密焊接, ARM 最小系统采用内核为 Cortex-M4 的 STM32 微处理器, 结合外设电路实现电源焊接流程任务控制、硬件电路开关控制与电信号反馈调控、人机通信、引弧等功能。驱动电路接收输出的 PWM 信号, 实现对两路直流电源中 SiC MOSFET 与高频电流调制电路中 IGBT 的驱动控制, 调控电源输出特性。电信号 ADC 采样反馈电路主要包括电流和电压采样模块, 把磁隔离采样反馈回来的电信号输入 ADC 模块进行数字滤波以及 PID 控制处理。

图 3 SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源控制系统总体框图

结合快频脉冲柔性波形调制 TIG 焊接技术的应用要求, 快频焊接电源主要性能指标如表 1 所示。

表 1 研制的快频脉冲柔性波形调制电源性能指标

序号	指标	数值
1	额定输入电压/V	3×380
2	额定输出功率/kW	4
3	额定输出电流/A	200
5	空载电压/V	80
6	逆变频率/kHz	100
7	快频脉冲波形频率/kHz	20

1.2 快频脉冲柔性波形调制

焊接电源输出电流决定了电弧特性和热输入量。如图 4 所示, 快频脉冲电源利用高频电流调制电路进行脉冲调制, 可以改变主电流 I_m 、副电流 I_b

和高压脉冲电流 I_D , 达到调制快频脉冲柔性波形的目的。其作用描述如下。

(1) 主电流 I_m (峰值): 主电流为低频脉冲电流(一般设定为 50 Hz)中的最大焊接电流, 既可作为直流模式中的恒定电流, 又可作为低频脉冲电流模式中的峰值电流。当每一次脉冲峰值电流流过工件时, 工件被加热熔化, 形成熔池。

(2) 副电流 I_b (基值): 副电流为低频脉冲电流(50 Hz)中的最小焊接电流, 用于维弧, 使熔池冷凝。

(3) 高频脉冲电流 I_D : 高频脉冲电流以占空比为 50%、频率为 20 kHz 的形式, 在主电流或副电流之间切换, 该电流主要产生电磁场来压缩电弧。

脉冲电流主电路产生图 4a 中 50 Hz 脉冲电流波形, 基值电流主电路产生图 4b 中直流电流, 两台直流电源结合高频电流调制电路使电流在 50 Hz 脉冲电流和直流电流之间形成 20 kHz 的脉冲(图 4c), 最终形成具有主电流(I_m)、副电流(I_b)和高压脉冲电流(I_D)的快频脉冲电流波形, 如图 4d 所示。

图 4 快频脉冲柔性波形

对应波形的控制流程如图 5 所示。快频脉冲电流值切换采用定时器控制, 以脉冲电流主电路中 50 Hz 脉冲电流波形为例, 当主电流(I_m)启动时, 定时器定时完成所设定的主电流(I_m)时间, 接着程序进入副电流(I_b)启动阶段, 定时器定时完成所设定的副电流(I_b)时间, 整个电流启动过程中, 加入高频电流调制电路 SW1 和 SW2 开关, 其驱动输入 20 kHz 互补 PWM 脉冲, 生成高频脉冲电流。两路电源控制电流进行叠加, 复合调制出快频脉冲柔性波形。

图5 快频脉冲柔性波形调制程序流程图

通过快频脉冲柔性波形调制技术, SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源可实现三种焊接模式。

(1) 恒流模式: 最基本的电流模式, 只有主电流成分, 电弧宽度范围大, 热量损耗严重。

(2) 脉冲电流模式: 分为低频脉冲电流和高频脉冲电流。低频脉冲电流模式为焊接电流在峰值基值之间一般以 50 Hz 的频率快速交替, 有较低的热输入, 可以减小薄工件的变形和开裂; 而高频脉冲电流模式为焊接电流在峰值与零点之间以 20 kHz 的频率快速交替, 由于受到电磁收缩作用, 热量较低频脉冲电流模式更为集中。

(3) 快频脉冲波形模式: 高频电流以 20 kHz 频率在主副电流与基值电流之间进行磁场调制, 热量输入最低。

1.3 钛合金焊接工艺

利用快频脉冲 TIG 焊对钛合金 TC4 进行堆焊焊接试验。试验材料为厚度 3 mm 的钛合金 TC4 板材, 焊前对板材表面进行打磨酸洗, 除去表面氧化膜。采用自主研发的 SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源, 直流正接法, 平均焊接电压为 20 V, 焊接电流采用快频脉冲波形, 焊枪氩气流量为 20 L/min。焊接是一个复杂的瞬变过程, 快频脉冲柔性波形调制电弧可视化有助于研究快频脉冲柔性波形调制 TIG 焊焊缝成形机理。本文搭建了高速摄影试验平台对钛合金的焊接过程进行电弧形态分析。采用德国 Optronis 公司生产的 CamRecord CL600x2 高速工业

相机, 分辨率可达 1 280×1 024, 帧率达 500 帧/s, 和尼康 AF MICRO-NIKKOR 60 mm F/2.8D 镜头。焊后截取焊缝制备金相试样, 分别采用光学显微镜 Leica DMI3000M 和高分辨场发射扫描电子显微镜 Zeiss-Merlin 观察焊缝显微组织。

2 结果与讨论

2.1 焊接波形

图 6a~6c 是 SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源输出的快频电流波形, 图 6d 是传统脉冲波形。从图 6b 中可以看出, 与传统脉冲波形图 6d 相比, 在 50 Hz 频率电流中调制入 20 kHz 的脉冲电流, 形成的快频脉冲电流波形动态响应性能仍保持良好, 电流波形输出规整。图 6c 是对图 6a 中的高频脉冲电流波形进行了时基放大, 从图中可以看出, 形成的快频脉冲电流波形动态响应性能仍保持良好, 上升时间为 0.6 ms, 下降时间为 1.2 ms, 电流波形输出规整。

图6 快频柔性波形和传统脉冲波形对比

2.2 电弧形态特性焊缝显微组织特征

为了对比快频脉冲波形和传统脉冲波形对 TIG 电弧形态的影响, 本文将一组快频脉冲波形和一组传统脉冲波形进行对比, 两组波形采用相同的控制变量方式, 具体参数如表 2 所示。

表 2 高速摄影试验所用对比波形参数设置

波形参数	快频脉冲柔性波形	传统脉冲波形
峰值电流/A	130	130
基值电流/A	80	80
脉冲占空比(%)	50	50
脉冲频率/Hz	50	50
高频脉冲电流幅值/A	50	—
快频脉冲频率/kHz	20	—

如图 7 所示, 两种波形 TIG 焊接的电弧形态有明显区别。与图 7b 相比, 图 7a 电弧呈钟罩形, 且直径较大, 电弧发散现象明显, 这是由于峰值电流比基值电流大, 因此电弧能量更大, 电弧明亮程度更高, 径向尺寸更大。而快频脉冲波形下的电弧的径向尺寸显著减少, 收缩效果明显。这是由于快频脉冲电流中带有频率为 20 kHz 的高频脉冲电流, 产生的电磁场会对电弧进行收缩, 形成与高能束焊类似的收缩柱状电弧。从对比还可以看出, 与传统脉冲波形 TIG 电弧会产生小幅电弧磁偏吹不同, 快频脉冲波形下的电弧由于高频效应而产生明显收缩, 电弧挺度更好, 电弧更加稳定。

(a) 处于峰值电流时刻的电弧形态

(b) 处于基值电流时刻的电弧形态

图 7 快频脉冲柔性波形与传统脉冲波形 TIG 电弧形态对比

2.3 焊缝显微组织特征

TC4 钛合金快频脉冲波形 TIG 焊焊缝及宏观金

相图如图 8、9 所示。焊缝宏观结构整体干净、变形小、焊缝均匀且具有窄的热影响区, 焊缝成形较好。

图 8 TC4 快频脉冲波形 TIG 焊焊缝

图 9 TC4 快频脉冲波形 TIG 焊宏观金相图

采用快频脉冲 TIG 焊, 以表 2 中快频脉冲波形参数进行焊接, 所得焊缝区显微组织如图 10a 所示, 由于晶核在熔池内部以近似相等的速度向各个方向自由生长, 钛合金晶粒形状为类椭圆形或者不规则多边形等轴晶, 平均晶粒尺寸为 0.165 mm。若采用传统脉冲 TIG 焊, 以表 2 中传统脉冲波形参数进行焊接, 焊缝区显微组织如图 11 所示, 焊缝平均晶粒尺寸为 0.575 mm, 采用快频脉冲波形焊接的钛合金晶粒尺寸减小了约 71%, 这说明了钛合金的快频脉冲波形 TIG 焊具有较好的细化晶粒作用。钛合金焊接接头的焊缝区域的晶粒大小主要取决于三个因素: 最高加热温度、此温度下的停留时间以及冷却速度^[29]。由于钛合金熔点高且导热性差, 热输入量高的传统脉冲 TIG 焊使得焊缝区和热影响区长时间过热, 导致 β 相晶粒粗化。在钛合金焊接过程中, 当焊接温度升高至 α 相 $\rightarrow$ β 相转变温度时, 母材中的 β 相与 α 相按先后顺序向高温 β 相转变, 同时 β 相的稳定元素从 α 相中析出, 与高温 β 相结合, 使其通过吞噬周围细小的 α 晶粒而迅速长大成巨大的粗化晶粒, 从而在焊缝区与热影响区分别形成粗大的柱状晶以及大小不一的等轴晶。在快频脉冲波形 TIG 焊过程中, 加入 20 kHz 的高频脉冲电流后, 收缩弧柱状电弧对焊缝熔池表面产生脉冲电弧力作用, 熔池内部液态金属受到频率达到 20 kHz 的搅拌作用, 将长大的晶粒破碎成更小的晶粒组织, 抑制晶粒长大, 而更小的晶粒成为新晶粒的形核核心, 重复着长大-破碎-形核的过程。

TC4 在冷却过程中会发生两种相变过程, 一种为扩散相变: 由高温 β 相 $\rightarrow$ α 相, 另一种为非扩散

切变：由高温 β 相 $\rightarrow\alpha'$ 马氏体相。根据钛合金连续冷却转变图， β 相 $\rightarrow\alpha$ 相转变的温度随着冷却速度的增大而降低，而 β 相 $\rightarrow\alpha'$ 相的相变温度则不受冷却速度的影响^[30]。焊接过程中，TC4 在冷却开始的高温阶段，温度梯度高，冷却速度快，高温 β 相首先进行非扩散切变， α' 马氏体相开始在 β 晶粒内部弥散形核，在原始 β 晶粒轮廓内出现网篮状板条 α' 马氏体相，如图 10a 所示。

如图 10b 所示，热影响区靠近焊缝区域的晶粒没有产生明显的长大，未形成晶粒粗大的粗晶区组织。这是由于快频脉冲 TIG 焊调制入 20 kHz 的脉冲电流，电弧热量更加集中，热影响区受热影响的

作用减弱，粗晶区组织在高温停留时间短， β 相组织没有足够的长大时间，晶粒较为细小。由于从焊缝中心至热影响区存在一定的温度梯度，冷却速度较焊缝中心慢，高温 β 相大部分发生扩散相变，形成针状 α 相，并且由于冷却速度慢，部分针状 α 相继续长大粗化。热影响区包含有较为模糊的晶界 α 相和长大的片状 α 相，晶粒内 α 相为针状， α 相和 β 相熔合程度高，无明显的晶粒相界。由于快频脉冲电流对熔池具有强烈的搅拌作用，促进晶核形成。同时，密排六方晶格的 α' 马氏体相沿晶界向晶内形核长大，最终形成如图 12 所示的均匀细长针状 α' 马氏体相。

图 10 TC4 快频脉冲波形 TIG 焊显微组织

图 11 TC4 传统脉冲波形 TIG 焊显微组织

图 12 TC4 快频脉冲 TIG 焊缝区 SEM 图

3 结 论

(1) 基于 SiC MOSFET 的超高频逆变技术, 自主研制 SiC MOSFET 快频脉冲焊接电源, 逆变频率为 100 kHz, 动态响应特性优异, 能稳定输出规整的 20 kHz 快频脉冲波形。

(2) 与传统脉冲 TIG 焊电弧相比, 快频脉冲柔性波形 TIG 焊电弧的收缩效果明显, 电弧径向尺寸显著减小, 电弧挺度增强, 电弧更加稳定。

(3) 与传统脉冲 TIG 焊相比, TC4 快频脉冲柔性波形调制 TIG 焊可明显细化焊缝组织, 改善热影响区组织结构, 焊缝成形较好, 焊缝区组织为网篮状特征的马氏体 α' 相。

参 考 文 献

- [1] MEHDI B, BADJI R, JI B, et al. Microstructure and residual stresses in Ti-6Al-4V alloy pulsed and unpulsed TIG welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 441-448.
- [2] BABU N, RAMAN S, MYTHILI R, et al. Correlation of microstructure with mechanical properties of TIG weldments of Ti-6Al-4V made with and without current pulsing[J]. Materials Characterization, 2007, 58(7): 581-587.
- [3] BABU N, RAMAN S, MYTHILI R, et al. Influence of current pulsing on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V TIG weldments [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(4): 442-447.
- [4] 许鸿吉, 尹丽香, 李晋炜, 等. TC4 钛合金电子束焊接接头组织和性能[J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 43-46.
XU Hongji, YIN Lixiang, LI Jinwei, et al. Microstructures and properties of TC4 titanium alloy joints welded by the electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(11): 43-46.
- [5] HU M, LIU J. Effects of zonal heat treatment on residual stresses and mechanical properties of electron beam welded TC4 alloy plates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(2): 324-329.
- [6] XU L, ZHU J, JING H, et al. Effects of deep cryogenic treatment on the residual stress and mechanical properties of electron-beam-welded Ti-6Al-4V joints[J]. Materials Science and Engineering: A. 2016, 673: 503-510.
- [7] LU W, SHI Y, LEI Y, et al. Effect of electron beam welding on the microstructures and mechanical properties of thick TC4-DT alloy[J]. Mater. Des., 2012, 34: 509-515.
- [8] WANG Y, QI B, CONG B, et al. Arc characteristics in double-pulsed VP-GTAW for aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 89-95.
- [9] YANG Z, QI B, CONG B, et al. Microstructure, tensile properties of Ti-6Al-4V by ultra high pulse frequency GTAW with low duty cycle[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 37-47.
- [10] FANG Y, LIU Z, CUI S, et al. Improving Q345 weld microstructure and mechanical properties with high frequency current arc in keyhole mode TIG welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 280-288.
- [11] 高晓刚, 董俊慧, 韩旭. TC4 钛合金 TIG 焊接头组织对性能的影响[J]. 焊接, 2016(7): 27-31.
GAO Xiaogang, DONG Junhui, HAN Xu. Effect of microstructure of TC4 titanium alloy joints welded by the TIG on properties[J]. Welding & Joining, 2016(7): 27-31.
- [12] YANG M, ZHENG H, QI B, et al. Effect of arc behavior on Ti-6Al-4V welds during high frequency pulsed arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017(243): 9-15.
- [13] 常云龙, 刘民军, 路林, 等. 电流脉冲频率对 TIG 焊电弧压力的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(5): 500-504.
CHANG Yunlong, LIU Minjun, LU Lin, et al. Effect of current pulse frequency on arc pressure of TIG welding [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(5): 500-504.
- [14] LEARY K, MERSON E, BIRMINGHAM K, et al. Microstructural and microtextural analysis of InterPulse GTCAW welds in Cp-Ti and Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(29-30): 7694-7705.
- [15] VAITHIYANATHAN V, BALASUBRAMANIAN V, MALARVIZHI S, et al. Gas tungsten constricted arc

- welding (GTCAW) parameters optimization to attain maximum tensile strength in Ti-6Al-4V alloy sheets used in aero-engine components[J]. Multiscale Multidiscip Model Exp. Des., 2019, 2(4): 291-291.
- [16] MURTHY C, GOPALA K, REDDY G. Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar metal gas tungsten constricted arc welds: Maraging steel to 13-8 Mo stainless steel[J]. Def. Technol., 2019, 15(1): 111-121.
- [17] KUMAR P, BHASKAR Y, MASTANAIAH P, et al. Study on dissimilar metals welding of 15CDV6 and SAE 4130 steels by inter pulse gas tungsten arc welding[J]. Procedia Materials Science, 2014, 5: 2382-2391.
- [18] SUNDARESAN S, RAM G, REDDY G. Microstructural refinement of weld fusion zones in α - β titanium alloys using pulsed current welding[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 262(1-2): 88-100.
- [19] LEARY R, MERSON E, BRYDSON R. Microtextures and grain boundary misorientation distributions in controlled heat input titanium alloy fusion welds[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 241(1): 012103.
- [20] 朱志明, 汤莹莹, 纪圣儒, 等. 超音频脉冲电源及其与焊接电源的并联耦合[J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 13-16.
- ZHU Zhiming, TANG Yingying, JI Shengru, et al. Ultrahigh frequency pulse power supply and its parallel coupling with welding power supply[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(8): 13-16.
- [21] YANG M, ZHENG H, QI B, et al. Microstructure and fatigue property of Ti-6Al-4V by ultrahigh frequency pulse welding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 139(4): 041015.
- [22] 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, 165.
- ZHONG Qiming, XIE Fangxiang, WANG Zhenmin. Research of a novel double-pulsed MIG welding power supply[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(7): 94-99, 165.
- [23] 王振民, 汪倩, 王鹏飞, 等. 新一代 WBG 弧焊逆变电源[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 49-52.
- WANG Zhenmin, WANG Qian, WANG Pengfei, et al. New generation WBG arc welding inverter power supply[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 49-52.
- [24] YANG L, LI K, DAI J, et al. Electrical performance and reliability characterization of a SiC MOSFET power module with embedded decoupling capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10594-10601.
- [25] GAO F, ZHOU Q, WANG P, et al. A gate driver of SiC MOSFET for suppressing the negative voltage spikes in a bridge circuit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2339-2353.
- [26] LIU T, WONG T, SHEN Z. A new characterization technique for extracting parasitic inductances of SiC power MOSFETs in discrete and module packages based on two-port S-parameters measurement[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9819-9833.
- [27] JI S, LAITINEN M, HUANG X, et al. Short circuit characterization and protection of 10 kV SiC MOSFET[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1755-1764.
- [28] LIN J, LÜ Y, LIU Y, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing[J]. Materials & Design, 2016, 102: 30-40.
- [29] LEVINE E, GREENHUT I, MARGOLIN H. Grain size and grain growth in an equiaxed alpha-beta titanium alloy[J]. Metallurgical Transactions, 1973, 4(11): 2519-2525.
- [30] WU K. Correlation of properties and microstructure in welded Ti-6Al-6V-2Sn[J]. Welding Journal, 1981, 60(11): 219-226.
-
- 作者简介: 吴健文, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要从事高端智能焊割装备及机器人方面的科研工作。
E-mail: 515433207@qq.com
- 王振民(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事高端智能焊割装备及机器人方面的科研和教学工作。发表论文 50 余篇。
E-mail: wangzhm@scut.edu.cn