

快速变换复合超音频脉冲 变极性氩弧焊接技术

Ultrafast-Convert Hybrid Ultrasonic Pulse Variable Polarity Arc Welding
Technique

北京航空航天大学 齐铂金 从保强 李伟 杨明轩



齐铂金

教授,博士生导师,中国机械工程师学会焊接学会理事,现任北京航空航天大学机械学院材料加工与控制工程系主任。长期从事焊接自动化、先进电源变换理论及应用等方面的研究工作,主持完成多项国家级课题,荣获多项科学技术奖励,获发明专利授权多项。

在航空飞机、发动机和航天器的研制生产中,焊接加工已经成为主导工艺方法之一。目前,尽管高能束流焊接(电子束、激光焊等)和固态焊接技术(搅拌摩擦焊等)都取得了较

新型快速变换复合超音频脉冲变极性氩弧焊接技术是一种优质高效的特种电弧焊接工艺技术,可显著改善和提高铝合金材料的电弧焊接质量,从根本上突破并解决了实际工程应用中急切希望解决的难题,可替代传统的氩弧焊接工艺,在发挥电弧焊接技术自身优势的基础上显著改善和提高我国国防军事、航空、航天工业中某些特殊结构材料和关键零部件结构的焊接质量,将具有重要的工程应用价值和推广应用前景。

大进步,但氩弧焊接工艺以其独特的优势和特点在今后相当长一段时间内仍将占据重要地位。随着我国对航空飞机、发动机和航天飞行器性能等方面要求的不断提高以及新型高强度铝合金材料的开发应用,目前我国电弧焊接技术水平已难以完全满足现代焊接生产的要求,尽管近些年诸多学者在研究电弧焊方面取得了进展,但是在高强度铝合金材料的实际电弧焊接加工过程中,许多关键技术和设备以及工艺难题(如接头软

化和气孔缺陷等)始终未能从根本上突破,因此研究开发一种适用于高强度铝合金材料的高效高质量电弧焊接加工工艺一直是材料加工领域的前沿课题^[1-2]。

快速变换复合超音频脉冲 变极性焊接

变极性电弧焊接技术(Variable polarity arc welding)是一种比较理想的用于铝合金材料的焊接方法。近年来研究结果表明,变极性电流的过



图1 新型快速变换复合超音频脉冲变极性电源原理样机

零过程以及电流上升沿和下降沿的变化速率(di/dt)对其焊接过程可产生重要影响,提高电流极性变换速率有利于改善和提高铝合金的焊接质量^[3-6]。但受限于电源硬件电路设计原理等诸多因素的制约,目前研究较为广泛的传统变极性焊接电源,其输出电流变化速率 di/dt 一般为 $5A/\mu s$ 左右,并且存在一定的过零时间^[7-8]。采用传统变极性氩弧焊工艺焊接新型高强度铝合金材料时,尽管可以减少焊缝中气孔、裂纹等焊接缺陷,但仍然存在接头严重软化等一系列问题,这大大降低了其构件的承载能力。

高频脉冲氩弧焊也是一种先进的特种焊接工艺方法。研究表明,在自由电弧的基础上加入高频脉冲电流,当脉冲电流频率达到较高的频率以后,尽管当时在电流脉冲控制等方面仍存在某些不足,但焊接电弧已经能够产生一种高频效应,大大增强焊接电弧的稳定性,并显示出更好的焊接适用性,可影响接头熔池液态金属的结晶过程,细化焊缝组织,从而有利于提高焊接接头的性能^[9]。在高频脉冲焊接过程中,其电流上升沿和

下降沿的变化速率(di/dt)是其重要的特征参数之一,脉冲电流的变化速率 di/dt 越快,对焊接过程的影响效果就越显著^[10-12]。另外,在金属材料制备领域,为了控制和改善金属的凝固组织,提高金属材料性能,施加脉冲电流已经成为在金属材料制备过程中采用的重要物理场技术。研究结果表明,脉冲电流对铝合金凝固组织具有显著的细化作用,且脉冲电流特征参数(如脉冲电流幅值、频率及占空比等)对其凝固组织结构会产生重要影响^[13-15]。

类似地,在传统铝合金变极性氩弧焊接过程中,引入高频脉冲方波电流的复合作用,合理选择和匹配各焊接工艺参数,就有可能对铝合金焊缝熔池金属的凝固过程和显微组织产生特殊作用,从而有助于改善和提高铝合金材料的焊接质量。国内有学者在传统变极性电流基础上引入了脉冲电流调制的方式,形成了具有高低频脉冲电流调制特性的复合变极性电流。初步研究结果表明,脉冲电流的加入对电弧焊接过程和焊接质量均产生了一定影响,但研究过程中普遍脉冲电流频率较低(不超过 $20kHz$)、脉冲电流幅值较小(仅为几十安培左右)且脉冲电流参数难以精确控制和独立调节^[16-17]。另外,加拿大 Liburdi 公司研制的电弧焊接设备在正极性电流持续期间也加入了高频脉冲电流的调制作用,但其脉冲电流频率最高仅达到 $10kHz$,脉冲电流幅值最大为 $40A$ 。

2005年,北京航空航天大学率先提出了“快速变换复合超音频脉冲方波变极性电弧焊接(Ultrafast-convert hybrid ultrasonic pulse variable polarity arc welding)”的概念,即在获得过零无死区时间且具有快速电流上升沿和下降沿变化速率变极性方波电流(与传统变极性电流 di/dt 为 $5A/\mu s$ 左右相比,提高10倍以上,即满足 $di/dt \geq 50A/\mu s$,故称其为快

速变换)的基础上,在正极性电流持续期间加入幅值达百安培以上的超音频脉冲方波电流(脉冲电流频率 $\geq 20kHz$),且超音频脉冲方波电流沿变化速率也满足 $di/dt \geq 50A/\mu s$ 。将其应用于铝合金材料的电弧焊接过程,电流极性的快速变换和超音频脉冲方波电流的加入将对实际电弧焊接过程产生显著影响,从而有助于明显改善和提高铝合金的焊接质量。

快速变换复合超音频脉冲变极性方波电流的实现

如何获得过零无死区时间且具有快速电流上升沿和下降沿变化速率的变极性方波电流和幅值达百安培以上的超音频脉冲方波电流,并准确实现超音频脉冲方波电流的复合调制,是研究开发新型复合超音频脉冲变极性氩弧焊工艺(Hybrid ultrasonic pulse variable polarity TIG, HPVP-TIG)的关键和技术难点。基于现代电源变换理论和技术,北京航空航天大学已经研究开发出一种主电路变换拓扑,成功研制出了一套新型氩弧焊接电源原理样机(见图1),实现了复合超音频脉冲变极性方波电流的输出^[18-19]。该原理样机输出正、负极性电流幅值最大 $400A$,复合脉冲电流频率最高 $80kHz$,占空比 $0\sim 100\%$,脉冲电流幅值达百安培以上,电流极性变化速率及脉冲电流上升沿和下降沿变化速率 $di/dt \geq 50A/\mu s$,同时基于DSP数字控制技术可实现对各电流特征参数的精确控制



图2 新型HPVP-TIG焊接试验平台

和独立调节,完全满足实际铝合金电弧焊接加工的需要。

采用数字式示波器获得的实际HPVP-TIG焊接电流波形,电流特征参数为正极性基值电流 20A,脉冲峰值电流 100A;脉冲电流频率 20kHz;脉冲占空比 50%;变极性电流频率 500Hz;负极性电流 120A;正负极性持续时间比 4:1。从电流变化曲线可知,电流从 -120A 上升至 +100A 以及从 +100A 下降至 -120A 仅用了约 $4\mu\text{s}$ ($di/dt \approx 55\text{A}/\mu\text{s}$),且电流过零点时无持续时间。

新型 HPVP-TIG 焊接工艺的适用性

基于研究开发出的新型变极性焊接电源原理样机,建立了铝合金HPVP-TIG电弧焊接试验平台(见图2),分别以铝镁系 5A06 和铝铜系 2219 铝合金为试验对象,从工艺性和使用性等方面研究分析了新型HPVP-TIG焊接工艺的适用性能。



(a) 样件 1 (施焊部位厚度 3mm)



(b) 样件 2 (施焊部位厚度 9mm)

图3 5A06铝合金HPVP-TIG焊缝成形外观

表1 主要焊接工艺参数

焊接工艺	常规 VPTIG	快速变换 VPTIG	HPVP-TIG
正极性基值电流 /A	—	—	100
正极性峰值电流 /A	160	155	200
负极性电流 /A	200	195	195
脉冲频率 /kHz	—	—	40
占空比 /%	—	—	20

图3为部分5A06铝合金HPVP-TIG焊缝的成形外观。采用X射线探伤方法对不同焊接工艺条件下获得的铝合金焊缝进行气孔缺陷等方面检测(见图4),可以看出,与常规VPTIG焊接工艺相比,采用新型HPVP-TIG工艺进行铝合金焊接可有效减少甚至消除焊缝气孔等缺陷,保证获得满意的焊缝成形^[20]。

分别采用常规VPTIG、快速变换VPTIG和HPVP-TIG3种工艺进行4mm厚2219-T87高强铝合金平板对焊,主要焊接工艺参数如表1所示(其他焊接参数一致)。与常规VPTIG焊接工艺相比,2219-T87高强铝合金HPVP-TIG焊缝抗拉强度和断后伸长率分别提高约32%和138%,焊接接头性能得到显著改善和提高。另外,研究过程中还发现超音频脉冲电流特征参数(脉冲频率、占空比及脉冲电流幅值等)对高强铝合金焊缝组织结构和力学性能还会产生重要影响^[21]。

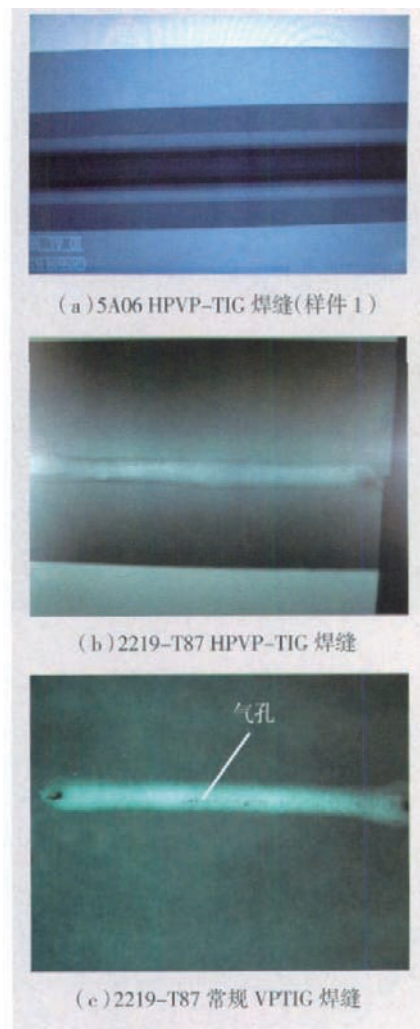


图4 铝合金焊缝X射线探伤

结束语

综合以上研究结果可知,新型快速变换复合超音频脉冲变极性氩弧焊接技术是一种优质高效的特种电弧焊接工艺技术,可显著改善和提高铝合金材料的电弧焊接质量,从根本上突破并解决了实际工程应用中急切希望解决的难题,可替代传统的氩弧焊接工艺,在发挥电弧焊接技术自身优势的基础上显著改善和提高我国国防军事、航空、航天工业中某些特殊结构材料和关键零部件结构的焊接质量,将具有重要的工程应用价值和推广应用前景。

本文有参考文献 21 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 岩石)