

穿孔等离子弧焊接过程的检测与控制*

Inspection and Control of Keyhole Plasma Arc Welding

山东大学材料科学与工程学院 武传松 贾传宝 刘祖明



武传松

山东大学材料科学与工程学院教授、博士生导师。一直致力于高效焊接过程数值模拟与检测控制方面的研究工作,先后主持完成和承担国家自然科学基金、国家科技支撑计划重点项目、国家高新技术发展计划(863)重点项目、省部及国际合作研究课题二十余项。在国内外重要学术刊物上发表170余篇论文(已被SCI收录72篇、EI收录113篇);出版3部专著(其中1部入选国家“三个一百”优秀原创图书出版工程)。

等离子弧焊接(PAW)技术是在钨极氩弧焊(TIG)的基础上诞生的一种压缩电弧焊接工艺。焊枪对电弧产生“机械压缩作用”、“热收缩作用”和“电磁收缩作用”,弧柱直径缩小、温度升高、能量密度增大,形成稳定的等离子弧。

随着高新技术的快速发展,高性能金属材料在航空航天、压力容器、船舶、机车车辆等行业内的应用日趋广泛,这些应用对焊接加工的效率、质量和成本提出了越来越高的要求,因此急需研发各类高效焊接工艺与设备。为了提高焊接效率,保证产品质量,等离子弧、激光束、电子束被应用于中厚板金属材料的焊接加工。这三类热源因其功率密度高,焊接时在熔池中产生小孔,因而能一次性单道焊透中厚板,焊缝深宽比大,热影响区窄。等离子弧焊、激光焊和电子束焊一同被归类为高能量密度焊接。激光焊接设备昂贵,运行成本较高;光斑小,对装配精度要求高;有色金

属对激光具有较高反射率,给激光焊带来困难。电子束焊要求在真空环境中进行焊接,限制了其在工业中的大量应用。与激光焊和电子束焊相比,虽然等离子弧的能量密度较低、小孔尺寸较大,但其作为电弧焊具有适应性强、对接头装配精度要求低的特点,属低成本、高效焊接工艺。因此,等离子弧焊接工艺广泛应用于汽车、飞机、火箭、太空飞船和空间焊接等^[1-7]。

然而,等离子弧独特的物理特性也为穿孔等离子弧焊接带来了一些问题,如等离子弧焊接熔池小孔的稳定性差,对焊接工艺条件的变化比较敏感,获得良好接头质量的合理规

* 国家自然科学基金资助项目
(No.50936003)。

范参数范围窄、可调裕度小^[8]。为解决这些问题,研发出“一脉一孔”的脉冲等离子弧焊接技术^[8-11],但其采用的普通方波脉冲电流波形有一定局限性,一般只适用于薄板焊接^[11]。针对中厚板的焊接,基于特殊设计的脉冲电流波形,通过对熔池穿孔状态的实时传感检测,在线调整脉冲焊接电流波形参数,控制小孔的周期性形成和闭合,实现受控脉冲穿孔等离子弧焊接,拓宽了适用的穿孔等离子弧焊接工艺参数区间,提高了穿孔等离子弧焊接过程的稳定性和鲁棒性^[12]。本文综述了近年来穿孔等离子弧焊接工艺过程检测与控制的研究现状,并着重介绍了受控脉冲穿孔等离子弧焊接控制系统。

穿孔等离子弧焊接的工艺特点与分类

等离子弧焊接(PAW)技术是在钨极氩弧焊(TIG)的基础上诞生的一种压缩电弧焊接工艺^[13-14]。焊枪对电弧产生“机械压缩作用”、“热收缩作用”和“电磁收缩作用”,弧柱直径缩小、温度升高、能量密度增大,形成稳定的等离子弧。

大电流等离子弧焊(100~300A)能够把工件完全熔透,并在等离子弧的作用下形成一个贯穿熔池的小孔,实现“单面焊接、双面成形”,焊缝断面呈喇叭形状,深宽比较大,热影响区较小,如图1所示。

穿孔等离子弧焊接过程受到诸多焊接工艺参数的影响,如喷嘴几何形状尺寸、钨极内缩量、喷嘴到工件距离、钨极材料及尺寸、焊接电流、等离子气体成分及流量、焊接速度、保护气体成分、流量等^[14-16]。焊接电流是一个重要的工艺参数。若焊接电流过小,则小孔直径过小,电弧不稳定,甚至导致“小孔效应”消失,造成未焊透、焊缝成形差、表面粗糙;若焊接电流过大,则小孔直径过大,会导致焊缝下塌甚至焊穿。在喷嘴几

何尺寸确定的条件下,焊接电流的变化有一个适宜的范围,而且和一定的离子气体流量相匹配。对于给定被焊材料,为获得稳定的穿孔等离子弧焊接过程,离子气体流量、焊接电流及焊接速度3个参数间应该合理进行匹配。

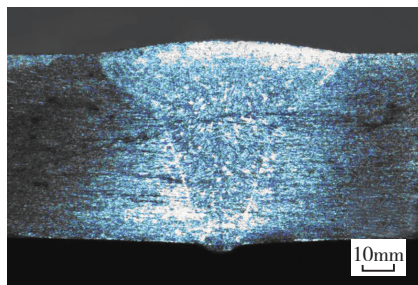


图1 典型穿孔等离子弧焊缝

根据焊接电源和焊接电流的不同,穿孔等离子弧焊接可以分为直流等离子弧焊接、脉冲等离子弧焊接、变极性等离子弧焊接和特殊等离子弧焊接等。

在等离子弧焊接过程中,若焊接电流为恒定直流,即称之为直流等离子弧焊接。由于在直流等离子弧焊接过程中,焊接工艺条件的微小变动,就可能导致小孔的闭合和焊接过程的不稳定,因此,直流等离子弧焊的焊接工艺参数可调裕度较小,限制了大规模应用。

若焊接电流采取直流脉冲波形,就是脉冲等离子弧焊接。其主要特点是输入功率可精确控制,并且可以采用“一脉一孔”的工艺模式,即在每一个脉冲周期内小孔出现并闭合一次(在峰值电流期间小孔形成——穿孔焊,在基值电流期间小孔闭合——熔化焊)。但是,普通方波电流“一脉一孔”的工艺模式一般只适合于4mm厚的薄件焊接。对于4mm以上较厚板的脉冲等离子弧焊接,由于形成接头时存在一个热量累积的过程,熔池的形成与凝固存在时间与空间上的差异,较难实现“一脉一孔”的工艺模式^[11]。

变极性等离子弧焊(VPPAW),

即不对称方波交流等离子弧焊接,是一种针对铝合金开发的新型高效焊接工艺方法^[7,17-20],解决了铝合金表面氧化膜的阴极清理和钨极烧损之间的矛盾。1978年,美国NASA宇航局马歇尔宇航中心购买了由Hobart Brothers公司制造、专用于铝合金焊接的大功率变极性等离子弧焊系统,用于航天飞机外储箱的焊接。变极性等离子弧焊(VPPAW)技术以其特有的工艺优势在铝合金和镁合金等构件焊接中得到广泛应用^[20-22]。但变极性等离子弧焊接设备价格较高。

在等离子弧焊工艺的基础上,国内外研究人员研发了特殊等离子弧焊接工艺,如双面电弧焊、熔化极等离子弧焊接工艺等。美国肯塔基大学张裕明将等离子弧焊枪和TIG焊枪分别置于工件两面,两把焊枪产生的电弧同时作用,开发了双面电弧焊技术^[23]。Essers、白岩等将等离子弧焊与MIG焊集成,开发了熔化极等离子弧焊接工艺,它结合了等离子弧焊和MIG焊的优点,焊丝和MIG电弧均被电离气体包围,电弧燃烧稳定,保护效果好;等离子体的阴极雾化作用清除了氧化膜,并且将熔滴和熔池的前沿与空气隔离,有助于获得优质焊缝;等离子弧、MIG电弧共同作用,可以加速焊丝的熔化,提高熔敷效率,是一种非常高效的焊接方法^[24-25]。

此外,将等离子弧和激光束进行复合,可构成PAW+激光复合热源焊接工艺。这一新工艺集成了等离子弧焊和激光焊的优点,达到了“1+1>2”的协同效应,提高了对工件间隙的适应能力,可以大幅度提高焊接效率,实现优质、高效焊接^[26]。

等离子弧焊接熔池与小孔的传感检测

美国肯塔基大学张裕明等研制了穿孔等离子弧焊尾焰电压信号检

测装置。利用工件与背面测量板之间的电弧放电效应,通过 RC 电路来检测二者之间的等离子弧尾焰电压变化。而该电压的大小也与穿过工件的等离子弧尾焰的多少有关系,所以通过检测该尾焰电压的大小即可得到小孔存在与否及小孔尺寸大小的信息^[27]。

Matcalfe 和 Quigley 提出了与尾焰电压测量相类似的尾焰光电测量法,利用放置于焊件背面的光敏元件检测尾焰的存在和大小,从而间接获知小孔存在与否及其尺寸信息^[1]。

清华大学王海燕、陈强等人采集了对应不同熔池小孔尺寸的电弧电压和电弧电流信号,采用快速傅立叶变换和短时傅立叶变换对电弧信号进行了分析,发现电压 pff 值的变化可以反映小孔大小的变化^[28]。孙久文和陈强等人也利用小波方法对电压信号进行了分析,并从中提取熔池穿孔的信息^[29]。但是,这种方法往往不能和电网的波动完全区分开,不能准确、可靠地检测到小孔出现时的信号^[2]。

王耀文和陈强等人从焊缝正面检测了穿孔等离子弧焊接过程中的音频信号^[30]。频域分析表明,声音信号的低频段分量(0~100Hz)在熔池处于不同阶段时有明显的变化,熔池处于过渡阶段时其值大、穿孔后其值小、未穿孔时其值居中。据此,设计出了声音信号的 A 算法,用于识别焊接过程中熔池的穿孔状态^[30-32]。但在穿孔前后,音频信号在时域和频域(5kHz~15kHz)无明显变化,非同次采集的音频信号也存在较大差异,因而这种方法在实际应用时也还存在较大的局限性^[2]。

董春林等针对不锈钢穿孔等离子弧焊接过程中熔池小孔的特征行为与弧光谱辐射强度之间的关系进行了光谱试验研究^[33,34],但小孔的尺寸与传感器信号之间存在较长时间的滞后,且精度不够高。

图像传感方法具有信息量大、不干扰焊接过程等特点。王慧钧^[35]采用工业黑白摄像机建立窄带复合滤光图像传感系统,利用高度变形的穿孔熔池液态金属表面对电弧焰心的反光提取到较清晰的熔池图像,对铝合金立焊穿孔熔池图像传感及焊缝稳定成形闭环控制进行了系统研究。图像法的传感信息检测系统较复杂,信息处理时间长,时间响应慢。

张裕明等人设计了一种传感器,如图 2 所示,利用等离子云(也称等离子体反翘)来检测小孔的状态^[36]。当工件还没有熔透时,熔池表面对等离子弧有反射作用,在工件表面以外区域有等离子云存在;此时,在等离子云的导电作用下,探针与工件形成一个封闭的回路;回路上的电阻有电流流过,能检测到其电压。当工件熔透、小孔形成时,等离子云不存在或者很弱,这时检测电路不能形成封闭的回路,电阻上没有电流流过,检

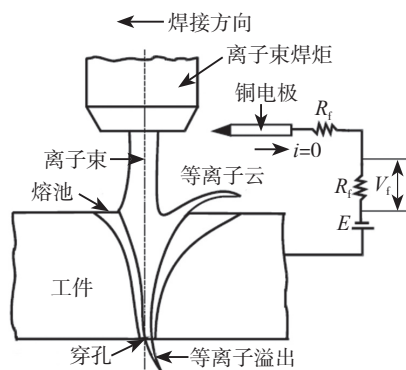


图2 等离子云传感原理

测到的电压为零。这样,可判断等离子弧焊接过程中工件是否穿孔。天津大学胡绳荪课题组也开展了相关的研究^[10,37]。易小林等人以等离子体鞘层理论为基础,测量出伸入等离子云的探针表面形成的鞘层电压,利用无电源探针检测法,根据鞘层电压的大小来判断等离子云喷射角的变化,从而得到焊缝熔深的状态^[38]。在这种等离子云导电法中,电路中的元件必须对光和热的辐射不敏感,而且

由于等离子云温度较高,检测探针易烧损,即使采用熔点较高的钨棒作为探针材料,若探针长时间处于等离子云喷射中心附近,也容易熔化,因此在试验中需准确控制焊接时间。另外,探针的正确放置也比较难掌握。

在背面传感和正面传感方法的基础上,代大山等基于多传感器信息融合开展了等离子弧焊接质量控制的研究^[13]。从焊接电流、焊接电压、小孔尾焰电压、焊接弧光特征谱线强度、焊接声音等多个渠道对小孔形态及焊缝质量进行监测,综合利用从各个传感器得来的数据和信息。但他们的实验主要针对 3mm 和 4mm 厚的低碳钢板。

穿孔等离子弧焊接过程的自动控制

焊接过程中,在获得小孔的尺寸和形态等信息之后,需要根据反馈信息对等离子弧焊接过程进行闭环控制。按照自动化技术发展的不同阶段,自动控制可以分为经典控制(如 PID 控制)和智能控制(如模糊控制、神经网络、人工智能等)。根据对焊接过程小孔形态的控制方式,也可以分为保持小孔尺寸恒定和控制小孔周期性开闭两种控制方法。

若在焊接过程中采用某种控制方法保证小孔始终处于“准稳态”,即小孔的尺寸、形状等在整个焊接过程中均保持不变,则可以得到良好的焊接质量。

美国马歇尔宇航中心采用神经网络来研究变极性等离子弧焊接过程^[39]。该神经网络由具有 10 个节点的隐藏层和有 2 个节点的输出层构成,输入端有 4 个参数:喷嘴高度、正向电流、反向电流、焊接速度;输出端有 2 个参数:正面焊缝宽度、反面焊缝宽度。董春林建立了等离子弧焊接模糊控制系统,控制对象是焊缝背面熔宽,通过调整焊接电流(普通直流)来对小孔状态进行控制^[33]。

以上研究者均采用直流恒定焊接电流作为控制量,这种控制方法仅仅改善了焊接过程的稳定性,但焊接工艺参数的裕度仍然较小。

国内外的研究人员选用典型的方波脉冲电流波形(如图3所示),研发出脉冲等离子弧焊接工艺,通过脉冲电流来控制小孔周期性地开闭。对于任意的工艺条件,首先选用足够大的脉冲峰值电流保证熔透和穿孔;一旦小孔形成并达到预定尺寸,立即将焊接电流降低,此时小孔闭合;然后再将焊接电流升高为峰值,小孔再次出现。依次重复上述过程。

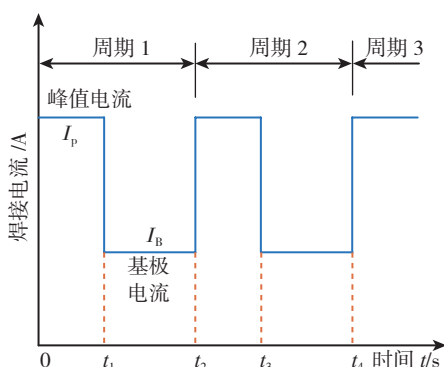


图3 典型方波脉冲电流波形

宋东风、韩俭等利用模糊控制技术进行了脉冲等离子弧焊接“一脉一孔”闭环控制的研究^[10,40]。但仅针对4mm平板和工字形焊件进行了闭环控制试验,且在焊接过程中脉冲

电流波形的参数如峰值电流等均保持不变。

上述“一脉一孔”的控制方法均采用普通方波脉冲焊接电流波形,小孔“开-闭”过程较剧烈;焊接电流波形参数的调整对热输入控制效果不够明显;没有针对中厚板开展穿孔等离子弧焊接试验。

脉冲后沿斜率可调的受控穿孔 PAW 系统

在穿孔等离子弧焊接过程中,为了使小孔的“开-闭-开”状态转换更加平稳,设计出脉冲后沿带2个缓降坡度的脉冲焊接电流波形,通过调节这两个下降斜率的大小,可更加灵活地控制热输入和等离子流动^[12]。其优点是,基于焊接过程中熔池穿孔状态,焊接电流下降速度的调整方式更加灵活,且小孔“开-闭”的过渡转换更加平稳^[41]。如图4所示,相对于方波脉冲波形,在焊接电流波形脉冲后沿增加了两个下降斜率(分别为 K_1 、 K_2),通过控制这两个下降斜率的大小,可以更加灵活地控制热输入和小孔的形成与闭

合。控制策略简介如下:在焊接电流波形变化的一个完整的脉冲周期内,当焊接电流在峰值持续一段时

间后(即从 t_1 到 t_2),在 t_2 时刻,工件恰好形成穿孔,则从 t_2 时刻将焊接电流以一定的斜率 K_1 缓慢降低,(由于 K_1 绝对值较小以及热惯性的影响,小孔尺寸可能会继续缓慢增大),到 t_3 时刻时,为了进一步降低热输入,加大焊接电流的降低速度(下降斜率为 K_2 , $|K_2| > |K_1|$);随着焊接电流的继续减小,热输入也相应的减小,在 t_3 到 t_4 这段时间内,小孔慢慢变小,直至闭合。 t_4 到 t_5 这段时间内焊接电流持续下降至基值,而 t_5 到 t_6 是基值电流作用时间,维持焊接过程的继续进行。同时 t_6 时刻又是下一个周期的开始。采用这样的焊接电流波形,既可以保证熔池穿孔、工件熔透,实现“单面焊接、双面成形”,同时也可以保证相邻两个脉冲所形成的熔池相互搭接,实现良好的焊接成形。

以小孔的平均尺寸为被控制量,即通过控制保持每个脉冲循环中的平均尾焰电压信号稳定,来保证恒定的小孔尺寸和熔透情况,并最终得到良好的焊接质量。控制系统结构框图如图5所示。

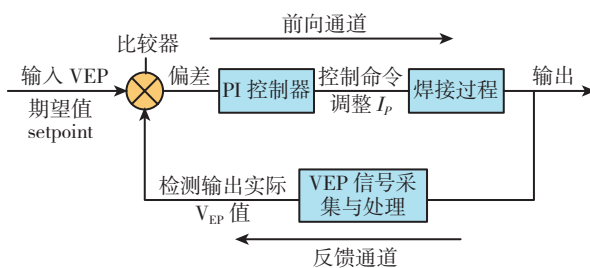


图5 闭环控制系统示意图

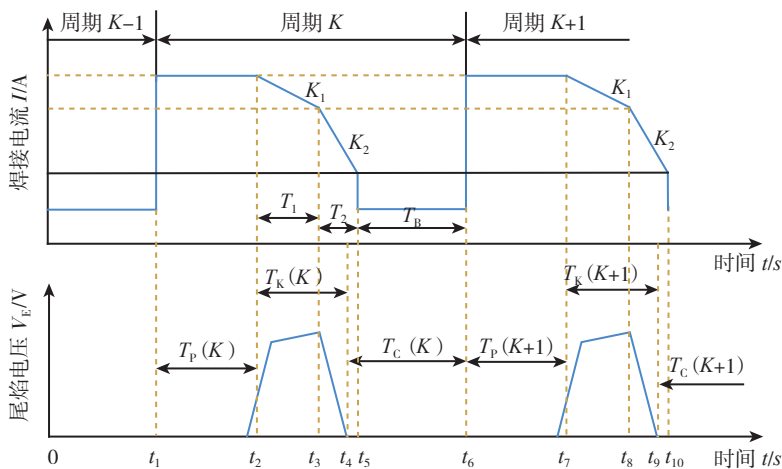


图4 受控脉冲穿孔的焊接电流波形

开展大量的焊接工艺试验,实时采集焊接电流信号和尾焰电压信号,获得开环控制系统的输入输出数据对,利用这些数据就可以通过系统辨识来得到焊接过程相应的数学模型。选择PI比例积分控制器。采用试凑法对PI参数进行整定,通过大量的焊接试验得到最合适的PI控制器参数。以描述小孔尺寸的尾焰电压为被控制量,以峰值电流及其作用时间以及2个后沿下降斜率为控制量。

根据实际测试的尾焰电压值与其设定值(系统输入)之间的差值进行相应调整,实现受控脉冲穿孔焊接。具体控制流程如图6所示。

试验选择6mm厚不锈钢板进行平板堆焊。焊件完全熔透,且焊缝正面和背面熔宽均匀。在焊接过程中,控制系统实时采集了焊接电流(图7a)、尾焰电压信号(图7b)等信号,并全部存储到计算机中。观察图7,受控脉冲电流峰值IP总是随着尾焰电压信号的变化进行实时调整,保证脉冲平均尾焰电压值 V_{EP} 始终围绕目标值 \bar{V}_{EP} 上下波动,控制效果良好。

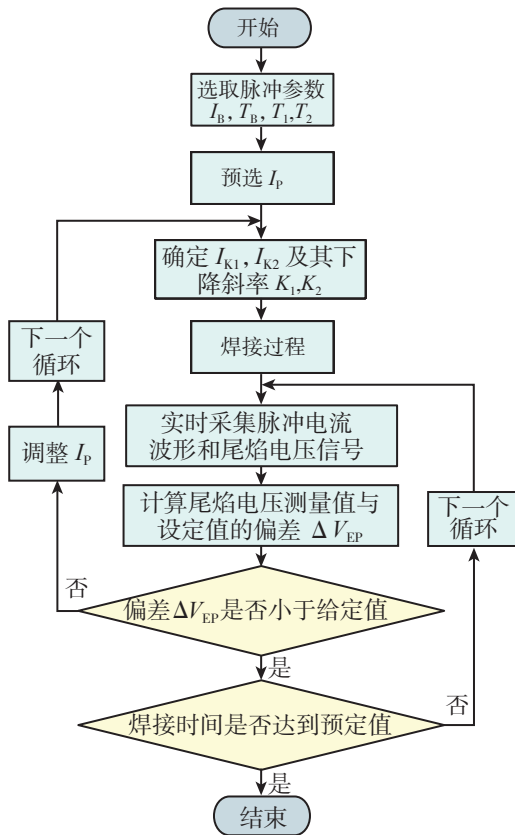
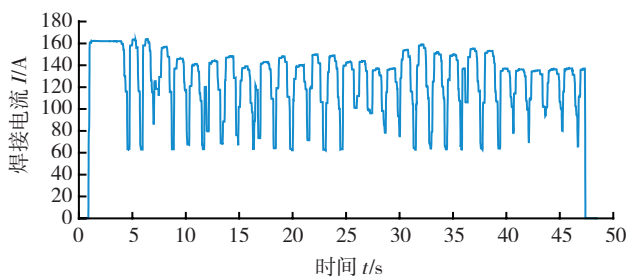
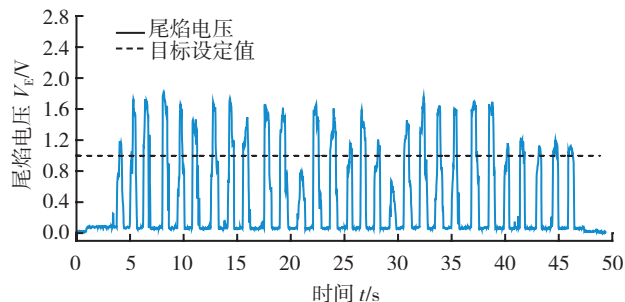


图6 系统控制流程图



(a) 焊接电流信号



(b) 尾焰电压信号

图7 试验过程中测试的焊接电流和尾焰电压信号

为了更好地观察受控脉冲电流波形与尾焰电压信号的响应情况,从

图7取30.5~36.0s时间段内的信号曲线,放大后进行观察。

实验结果表明:首先,实际焊接电流波形与系统输出受控脉冲电流波形基本一致,峰值电流IP的调整响应快、焊接过程稳定。

其次,实际尾焰电压信号围绕系统控制目标 $\bar{V}_{EP} = 1V$ 波动,且信号幅值保持稳定,说明焊接过程中小孔行为也过渡平稳,证明系统准确工作在“一脉一孔”状态,并且小孔从“开启”到“闭合”的状态转变过程平稳。

结论

(1) 直流等离子弧焊接熔池小孔的稳定性差,对焊接工艺条件的变化比较敏感,获得良好接头质量的合理规范参数范围窄、可调裕度小。普通方波电流“一脉一孔”的工艺模式能在一定程度上扩展工艺参数范围,但一般只适合于4mm以下厚度的薄件焊接。对于4mm以上较厚板的脉冲等离子弧焊接,由于接头形成存在一个热量累积的过程,熔池的形成于凝固存在时间与空间上的差异,较难实现“一脉一孔”的工艺模式。

(2) 研制出电流脉冲后沿带两个缓降坡度的受控穿孔等离子弧焊接系统。实验结果表明,与原来的方波相比,这种特殊设计的脉冲电流波形,能够保证小孔从“开启”到“闭合”的状态转变过程更加平稳。

(3) 6mm厚不锈钢板焊接控制试验表明,受控穿孔等离子弧焊接系统准确工作在“一脉一孔”状态,运行稳定、可靠。与原来的方波电流相比,脉冲后沿带两个缓降坡度的脉冲电流波形更有效地对穿孔状态做出响应。焊缝成形良好,正、反面熔宽均匀一致。

本文有参考文献41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 侧卫)