

高品质电子束焊接适用 技术浅述

Application Technology of High Quality Electronic Beam Welding

首都航天机械公司 张益坤 谢美蓉



张益坤

首都航天机械公司工艺研究所特种焊接工艺技中心主任,中国机械工程师学会特种焊接技术委员会和中国电工学会电子束离子束委员会委员。主要研究方向为特种焊接设备及工艺。

真空电子束焊接技术是指利用加速聚焦的电子束流轰击焊件接缝所产生的能量,迅速熔化金属而完成焊接的熔焊方法,具有高效能、大深宽比、小变形、复现性好等特点,适合精密焊接,能解决特殊结构和活泼、难熔材料的焊接问题,在航空航天、核能、动力、机械等众多制造技术领

域发挥了重要作用,产生了巨大效益。先进的电子束焊接技术在我国航天领域还蕴藏着巨大的应用潜力和广阔的开发空间。

电子束焊接技术对航天产品的重要作用

真空电子束焊接技术在满足航天飞行器关键构件的减重、延寿、高可靠性和低成本等方面独具优势,对航天技术的发展起到了重要作用。

第一,由于飞行器的空气动力外形要求和零部件减重的需要,航天产品要求体积小、重量轻,焊接变形小或焊后不加工。因此,对零件的结构设计、材料选择及加工工艺都提出了极为苛刻的要求,电子束焊接能量密度高,焊缝深而窄,电子束功率可精密调节,有利于实现高质量精密焊接。第二,在真空状态下,金属的冶金态是最好的,这样理想纯净的环

境,对熔化金属只有净化、提纯作用,不会带来任何污染,而且制造真空环境也比制作其他任何保护气体都更加便宜。航天产品广泛采用钛、铝及其合金等活性轻金属,真空是现有最可靠和最经济的保护环境。第三,航天产品通常十分昂贵且生产周期长。一个电铸产品的生产周期在几十天,如果生产质量不稳定,会影响整个产品制造周期。因此,要求焊接品质具有高可靠性和可重复性,并实现焊接过程的质量控制即时跟踪管理,现代的电子束焊接设备可以很好地满足上述要求。

典型适用技术在电子束焊接上的应用

1 电子枪

电子枪工作过程的不稳定通常由以下原因引起:(1)焊接时在真空室内焊接材料产生蒸发现象,金属蒸

汽进入电子枪中,在阴极组件间电离产生电弧。(2)电子枪中的大加热电流产生热与电磁场,引起阴极变形,继而影响电子枪工作的可靠性。这些因素容易造成束流不稳定乃至焊接中断,从而影响焊接工艺质量。

从控制电子束的方式看,有二极电子枪和三极电子枪之分,早期的低压型焊接电子枪中虽然有3个电极,即阴极、控制极和阳极,但控制极始终和阴极处于同一电位,故属于二极枪,特点是工作可靠,但是束斑品质差。三极枪中,控制极处于比阴极更负的电位,称为负偏压,利用负偏压可控制电子束流的导通和截止,调节电子束流的大小,还可以配置适当电路,产生脉冲电子束。现代焊接电子枪普遍采用三极枪。但是三极枪控制极与阴极距离很近,焊接时金属蒸汽与电磁场的作用很容易发生高压放电,对焊接产品造成损伤。

近年来,人们在为解决大厚度材料焊接而研制的大功率(>100kW)电子枪中,有的又采用了二极枪,重点研究提高二极枪电子束品质特性,在保证束流质量的前提下消除因焊接金属蒸汽引起的控制极失控问题。

加拿大PAVAC工业公司的电子枪采用激光加热间热式阴极,利用激光加热代替电子轰击加热阴极。激光加热系统确保了电子束枪的阴极(灯丝)加热时不会产生由直流或交流电流(传统焊枪设计)引起的磁电流,无磁场干扰,能形成稳定的束斑和束流强度。并且激光加热阴极的形状为特殊定制,决定了束流形貌的特殊性,有助于减少电弧放电。

2 电子光学成像

如果零件装配紧密或光照反射,在通过光学视镜或CCD电视观察时不易界定焊缝位置,电子光学成像观察可以很好地解决紧密焊缝观察问题,非常适于手动或自动焊缝定位和焊接结果检测,它也是焊缝跟踪、束斑形貌分析和束流自动校正的基础。

电子光学成像系统采用电子束发生器作为电子发生源,探测板收集反射电子,专用软件和CNC系统利用二次电子信息来显示焊接过程且控制焊接参数。通过电子束发生器产生束流并使它在工件表面扫描,收集反射回来的电子并进行处理后,可产生工件表面的图像。利用二次电子进行图像处理的优势在于可抓取到更多工件表面的细节。与光学观察系统不同,它可以非常清楚地显示出不同材料之间的差异。利用电子光学成像放大的倍率能够达到2万倍,而利用可见光的放大倍率只有1000倍。根据不同的扫描范围、形状和电子束的密度,可以调整、修改图像及其解像度。电子光学成像在图像质量、可靠性和利用率等方面有很大优势,并且不会被金属蒸汽污染。

3 束斑品质特性检测

质量控制是焊接工艺过程中非常重要的一环。航天产品焊接中经常遇到同批次产品的生产虽然采用了相同的焊接参数(加速电压、电子束流、焊接速度等),得到焊接结果却不同,这其中束斑品质起着重要作用。焊接结果的可重复性很大程度取决于电子束能量密度分布的可重复性,理想的电子束能量密度分布呈高斯分布特征,但受机械特性、电磁特性以及聚焦系统的控制影响,电子束能量密度的分布会在使用中发生一些变化,影响焊接质量一致性。

目前,欧洲电子束焊机生产厂家已能成熟地使用快速简便的工程化应用电子束诊断系统,在焊接重要产品前进行束斑品质特性检测,能够获得电子束束斑品质的量化特征,包括束斑直径和电子束能量密度分布等,保证焊接结果重复性。

4 电子束流自动分析调整

电子束流自动分析调整包括自动聚焦和束流自动校准。

电子束流在工件表面聚焦状态

(焦点位置)是焊接参数的重要一项,聚焦位置是否合适直接关系到产品的焊缝表面质量及内部熔深情况,目视调整聚焦状态受到操作者经验、观察位置影响,容易产生偏差。自动聚焦就是电子束下束时,利用传感器检测并量化接收的二次反射电子,对比电子能量的密度情况,进一步判断是否处于聚焦状态,传输给CNC系统用于控制和调整聚焦电流参数,达到自动聚焦的目的,避免依靠操作人员的技能和经验调节聚焦位置。

束流自动校准就是更换阴极后对电子束的合轴性进行自动的调整和检查,能够对电子束束流的圆度、束流同心度等进行自动校准。

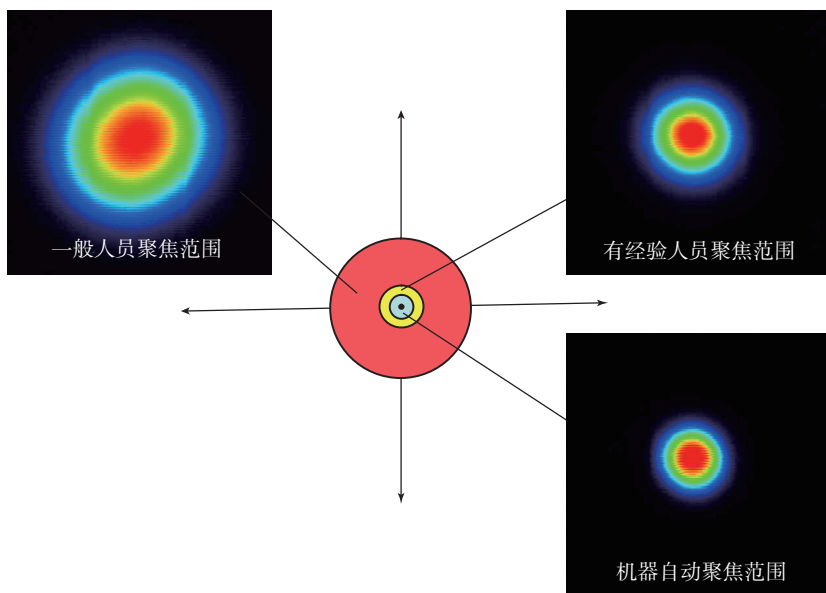
电子束流自动分析调整系统具有实时监测束流最佳状态的能力,给操作人员提供了直接进行束流优化的可能性,操作人员只需要按动校正按钮,之后系统就会自动完成所有校正工作,可以实现束流自动优化。在校正过程中,电子束的聚焦,消除象散的补偿和透镜的合轴对中自动完成,所有的设置参数被记录并用于质量监控,其束流分布的可重复性显著高于人工调节的水平。

5 二次电子焊缝跟踪

焊接过程中的焊接微变形和同一产品重复装夹的装配偏差都会影响焊缝的对中,操作人员需要实时观察并调整焊缝位置。采用二次电子焊缝自动跟踪技术可以自动适应焊缝变形,测量并纠正装配造成的焊缝位置偏差,实现焊缝对中。

其原理是利用二次电子提取到工件表面相关的结构与形状,用于决定焊缝的位置,将其保存在控制系统中,采用束偏转系统或工作台随动定位系统对焊缝进行跟踪。

二次电子焊缝自动跟踪系统应用的较为成功的典型例子是乌克兰巴顿焊接研究所研制的RASTR-3焊缝自动跟踪系统。该系统用小束流对焊缝进行扫描,二次电子接收板接



电子束束流自动分析校准

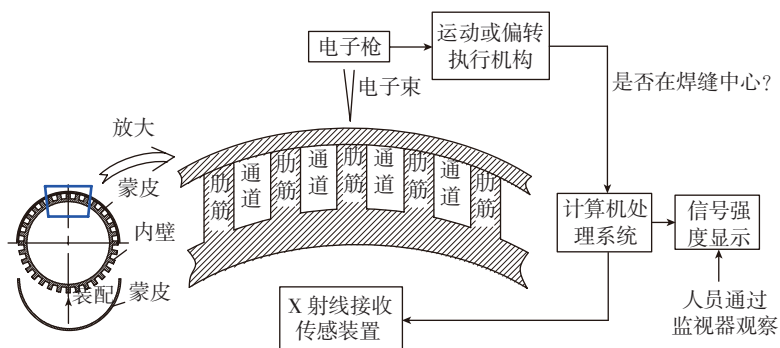
收并分析二次电子反射的信号,找出焊缝的位置并与原来位置进行比较,如无偏差,则束斑位置不变;如有偏差,则调整电子枪的执行机构,移动束斑点至焊缝处进行焊接。德国 Pro-beam 公司的电子束焊接设备能利用二次反射电子进行焊缝对比度和锐度的优化,检测和跟踪焊缝。

6 X 射线盲焊定位

蒙皮夹层通道体式结构是火箭发动机燃烧室常用结构,不可见焊缝的准确定位是实现此类结构盲焊的关键技术之一。现通常采用焊前划线标示焊缝位置,然后示教跟踪的方法定位焊缝中心。但随着焊缝数量增多,密集程度加大,焊接变形及装

配误差的积累,导致最后的焊缝偏差较大。X 射线盲焊定位技术为该类结构件焊接提供了新的解决方法。

电子束撞击到材料表面时,将产生 X 射线、二次电子、散射电子等,利用射线产生原理,对于内壁有筋条、外壳是蒙皮的不可见夹层焊缝结构的焊接,在工件的内部放置射线接收传感器装置,小束流入射到工件表面,根据其行进速度的不同,产生的 X 射线以一定的间隔扫描产品的内部结构,其信息通过传感器输入计算机处理系统,并通过各种电子放大器采用数字化的 CRT 显示器信号,创建重要的信号强度分布图,显示出光束的强度曲线,计算出对称曲线中



X射线盲焊示意图

心,定位为焊缝的中心。

加拿大 PAVAC 公司电子束系统的 X 射线扫描焊缝定位功能,非常适合焊接夹层结构板材。

7 低温冷凝泵

低温冷凝泵将快速对所有气体迅速干净地抽至 $10^{-9} \sim 10^{-3}$ mbar ($10^{-7} \sim 0.1$ Pa) 范围的真空度。低温泵可以将所有气体冷凝,并保持在非常低的真空度下,速度快、吞吐量大。低温泵能将水蒸汽凝结在 0°C 以下,使空气中水蒸汽的分压强降低,以达到抽除水蒸汽的目的。低温泵特别适合高温下易于吸氢吸氧的轻质活泼金属,如钛合金、铝合金等材料的焊接,其对真空度要求高。在湿度较大的环境下,针对深腔体类结构件的焊接,其腔体内的水气、杂质等在低温冷凝泵的作用下易于排出。

新电子束焊接技术在航天领域的需求

电子束技术发展到今天,现代电子束焊接设备已具有高水平的束流品质,并可实现束流自动校准、焊缝跟踪定位及实时质量控制等适用技术,为航天产品生产提供了更多合适的解决方案。这些技术对于航天产品应满足:

(1) 对已经实现的并且纳入质量管理内容的焊接品质要求具有绝对的可重复性。

(2) 因为航天产品的特殊性和重要性,应减少依靠人员经验的操作内容,焊接设备在满足高性能的前提下,保证使用稳定可靠。

(3) 完善质量控制过程和证明文件实时记录工作,焊接设备能自动实现焊接过程各项工艺参数的采集、处理、记录等,使质量控制可追溯。

适时地开发电子束焊接先进技术,能够有针对性地解决未来航天型号研制中很多潜在的问题,而电子束技术会为航天生产领域提供更多合适的解决方案。(责编 小颖)