



编者按：电子束焊接是一种先进、成熟的高能束焊接技术，在国外航空、航天、核能、动力、机械、汽车、电子医疗器械等众多制造技术领域发挥了重要作用，产生了巨大效益。在我国实现工业化的进程中，先进的电子束焊接技术在我国制造业中还蕴藏着巨大的应用潜力和广阔的开发空间。作者通过对大量资料的分析研究，撰写此文，旨在宣传、推动、发展我国的电子束焊接技术。本刊将分期连载，以饕读者。

电子束焊接技术发展历史、现状及展望（II）

首都航天机械公司 刘春飞 张益坤

TG4 B

文摘 回顾了电子束焊接技术的产生、发展历史，论述了电子束焊接的特点、分类，对国内外各时期电子束焊接发展情况做了介绍，展望了电子束焊接技术的发展趋势，并对进一步发展我国电子束焊接技术提出了建议。

主题词 电子束焊接 电子束焊接设备 现状及展望 建议

2.3 电子束焊接的分类

从不同的角度出发，电子束焊接可有多种分类方法。

按照电子束加速电压的不同，即按电子束热源特点的不同，可有高(电)压电子束焊接和低(电)压电子束焊接之分；

按保护焊接熔池金属的环境不同，有高真空、低真空和非真空电子束焊接之分；

按焊接时整个焊件是否完全处在真空室内，有全真空和局部真空电子束焊接之分。

此外，若按设备类型或特征来分，还可根据真空室容积的大小分为大型、中型、小型（或台式）电子束焊机，按功率大小亦有大功率、中等功率和小功率（或微型）电子束焊机之分。按电子枪在焊接过程中可否运动。可分为动枪式电子束焊机和定枪式电子束焊机。按操作过程的控制方式有手动控制、自动控制、数控和计算机控制等。

按照设备的专业化程度，可以分为通用型电

子束焊机和专用型电子束焊机。

为了适应人类开发外层空间活动的需要，人们还研制了专门用于在外层空间进行焊接的空间用电子束焊接设备。

虽然电子束焊接及其设备的种类很多，但是能比较全面、集中体现出前面所介绍过的电子束焊接能量密度高、保护条件好、控制方便等特点的还是高压型高真空电子束焊接。而其余类型的电子束焊接只能从不同角度，在不同程度上反映出电子束焊接的某些特点，也正是这些特点的充分发挥，使电子束焊接的应用范围不断拓宽，几乎渗透到制造业的各个领域。

下面仅对几种类型的电子束焊接技术予以分析介绍。

2.3.1 高(电)压型和低(电)压型电子束焊接

在电子束焊接技术发展的早期阶段，曾有低压型（15~30kV）、中压型（40~60kV）和高压型（100~150kV）电子束焊接之分。到了上个世纪70

年代,日本学者又提出了超高压型(300kV或以上)电子束焊接,并研制了使电子束通过具有多级加速孔板的加速筒后,能达到300kV的超高压型电子束焊接装置。

如今,在制造业中获得生产应用的电子束焊接设备,人们习惯分为高压和低压两种类型:

(1)额定加速电压在60kV左右的,一般称为低压型;

(2)额定加速电压在100kV以上(通常为150kV)的统称为高压型。

而30kV以下的设备现在已经很少生产,这一方面是由于加速电压很低时,电子束的品质特性较差,另一方面是由于高压元器件、电子枪和高压电源制造技术水平的提高,使得制造60kV和30kV设备之间,几乎已经不存在技术难点。而所谓超高压型目前仅用于试验研究,还没有在工业生产中获得实际应用。

其实高压型和低压型电子束焊机产生和控制电子束的基本原理是相同的,只是有效应用范围和焊接对象不同。

高压型电子束和低压型的主要区别之一,表现在最大有效工作距离不同。高压型电子束因空间电荷效应小,因此当透镜和焊件距离达700~800mm,甚至超过1000mm时,电子束仍然可以保持很高的功率密度,实现深穿透焊接,并能有效避免金属蒸汽对电子枪的污染。同时高压电子束抗杂散电磁场随机干扰能力强,电子束的“挺度”好。区别之二是在相同功率下,高压型电子束可以被聚焦得更细,获得更小的焦点。因为高压电子枪的阴极尺寸小,电子束会聚角也小,高加速电压和小束流使得电子束由于热初速和空间电荷造成的象差和散焦现象明显减小,能将电子束会聚成更细的束径,获得更高的功率密度。分析计算结果表明:

$$D \propto I^{1/4} V^{7/4}$$

式中: D ——电子束功率密度;

I ——电子束流;

V ——加速电压。

可见,提高加速电压比增加束流能更有效地

提高功率密度。因此,高压型电子束比低压型更适于精密焊接和大厚度焊接。这也是非真空电子束焊接都采用高压电子束的原因。但是,产生高压电子束的高压型电子枪体积庞大,结构复杂。而低压型电子枪体积较小,结构简单,故各种动枪式电子束焊机几乎均采用低压枪。

早期高压型电子束焊接设备的售价一般为低压型的2~3倍。近年来,随着技术进步,这一价格差距已明显缩小。但高压型设备的价格仍比相似用途指标的低压型设备高很多。

此外,对X射线的防护也是选择高压型焊机时必须认真考虑的因素。当加速电压为60kV时,真空室的钢板厚度超过12mm就可以有效屏蔽X射线。而当电压超过100kV时,通常需要在真空室外壁包覆铅板以屏蔽X射线。虽然在焊机设计和制造时,都已考虑到对X射线的防护问题,但是在设备运行或检修之后,对X射线的防护仍然必须认真对待。这也是除价格问题之外,人们竭力避免选择高压型设备的另一主要原因。

令人欣慰的是随着电子束焊接技术的发展,电子枪设计制造技术不断提高,低压型电子枪的技术性能与高压枪的差距有逐步缩小的趋势,例如法国TECHMETA公司称其制造的低压型(60kV)电子枪,在焊接铝合金活塞时,能获得和高压型枪相同的焊接效果。

2.3.2 高真空、低真空和非真空电子束焊接

按照焊接熔池免遭大气作用的程度不同,电子束焊接可分为工作真空度在 $1.33 \times 10^{-1} \sim 1.33 \times 10^{-4}$ Pa之间的高真空电子束焊接,工作真空度在 $1.33 \sim 66.65$ Pa之间的低真空电子束焊接,以及在大气压下进行的非真空电子束焊接。(见图5)。然而这三类焊接装置电子枪(或称电子束发生器)都必须工作在 1.33×10^{-3} Pa以上的高真空中。这里所说的高真空、低真空的界限与真空技术中的界限不同。在电子束焊接中,人们习惯于把焊接室需要用扩散泵(俗称高泵)抽空获得的真空度,称为高真空。而只需用机械泵(俗称低泵,包括罗茨泵)抽空获得的,称为低真空。

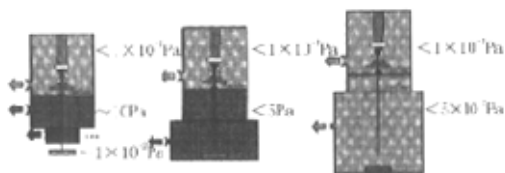


图5 电子束焊接按真空度分类

高真空电子束焊接能为焊缝金属提供理想的保护环境,避免各种有害气体的污染;能使电子束有很大的工作距离,不致因发生电子束散射而降低束斑功率密度,影响深穿透效应。但是,抽真空时间长是这类设备的主要缺点。

从材料上看,高真空设备适合焊接难熔金属、活性金属、耐热合金和精密合金等。从零件上看,高真空设备适用于电子工业、仪器制造、精密机械中的精密零件焊接,以及航空航天、核工业中的中、小型或大型零件的焊接,如核燃料元件、液体火箭发动机部组件、以及航空发动机构件。从生产的角度看,高真空设备适用于生产效率较低,尺寸大小可以装进真空中焊接的单件或小批量生产。

低真空电子束焊接装置同高真空相比,最显著的特点是不仅简化了焊接室的抽真空系统,而且大大缩短了焊接室的抽真空时间。因为在高真空时,抽气时间主要决定于焊接室、工作台、夹具和工件的表面放气,这个放气过程实质是这些固体表面对气体分子的物理吸附与化学吸附,在真空状态下逐渐脱附的结果。而在低真空焊接时,预先抽出的主要是充满焊接室空间的气体。这就大大缩短了焊接循环时间,提高了生产效率。虽然焊接是在低真空中进行的,但当真空度优于4Pa时,束流功率密度与高真空时相差不大,对焊缝熔深和形状影响较小。低真空电子束焊接特别适合于大批量生产或在生产线上使用,例如汽车工业中的齿轮组件、轴类零件的大批量生产,焊后不可不再加工。

真空电子束焊接的特点,引起了制造业诸多行业的兴趣。但是,真空电子束焊接时需要真空

室,因而其应用受到限制。此外,还有许多工件尺寸太大,或工件材料在真空中焊接时会析出大量气体,很难在真空中焊接。在这种需求的牵引下,非真空电子束焊接技术应运而生。

非真空电子束焊接不需要真空室,是在大气压下进行的焊接。因此,焊件尺寸摆脱了真空室限制,省去了抽空时间,这就带来了如下特点:

(1)可连续焊接大型工件的长焊缝,仍不同程度地保持着真空电子束焊的特点,焊接速度比氩弧焊高10倍以上,收缩变形可以仅为氩弧焊的十分之一,焊缝深宽比可达5:1;

(2)非真空电子束的束斑直径一般在1.5~2.5mm之间,且焊缝断面形状呈花瓶状,因此对接头间隙和电子束对中要求不像真空电子束焊接那样严格。

非真空电子束焊接的局限性是:当电子束被引入到大气中时,周围气体分子碰撞发生散射致使功率密度逐渐降低。所以在大气压下,电子束只能在很短的一段距离保持其最初的功率密度,电子束的出口到工件接头的最大工作距离不能超过25mm。因此,焊接外形复杂的工件时,要受电子束可达性的限制。当向电子束出口处吹送相对密度(ρ)比空气($\rho=1.0$)小得多的氦气($\rho=0.14$)作保护气时,工作距离可以延长到50mm。通常不用氩气作为非真空电子束焊接的保护气体,因为氩气的相对密度($\rho=1.38$)比空气大得多,散射电子束的能力也比空气大。

显然,由于功率密度的降低,非真空电子束的穿透深度要比真空电子束小得多,并与工作距离有关。目前,非真空电子束焊接的最大熔深可达30mm。同真空电子束焊接相比,非真空电子束不能通过改变聚焦使焊接特性发生很大变化,电子束也不能偏转和摆动。此外,非真空电子束为了有效降低气体分子的散射作用,都采用高压电子束,因此必须采取有效措施屏蔽X射线,以确保现场人员的安全。

非真空电子束焊缝要比真空电子束焊宽很多,但同常规气体保护焊相比,仍具有深而窄的特点,同时焊接效率高,因此在汽车行业和冶金

行业的大批量生产中获得了应用。

2.3.3 按电子枪特征分类

(1) 定枪式和动枪式

电子束焊接设备按电子枪的安装和工作方式不同,可分为定枪式和动枪式。定枪式电子束焊机是指电子枪固定安装在焊接室的顶部或侧壁,焊接时电子枪不动,依靠工件相对电子束的运动形成焊缝。而动枪式是指电子枪安装在焊接室内部的运动装置上,可沿几个方向运动、倾斜或旋转,依靠电子枪的运动(或同时伴随工件的运动)形成焊缝。

对某些工件上位于极端位置的焊缝,采用动枪式焊机比定枪式所需要的真空室容积小,抽真空时间短,焊接可达性好,具有较好的灵活性。为了便于电子枪在真空室内运动,要求电子枪结构紧凑、体积小。因此,动枪多采用低压型电子枪。

随着真空密封技术的发展,有一些安装在真空室顶部或侧壁的电子枪,在真空状态下也可以沿特制的密封滑槽运动,但这种运动仅用于焊前调整和对中,而不是用于焊接,这种电子枪,习惯上仍称为定枪。近年来又出现了依靠安装在真空室顶部的电子枪运动来形成焊缝的方案,这类设备的电子枪虽然位于真空室之外,但是也应属于动枪之列。法国 TECHMETA 公司生产的某些设备即属这一类型。

(2) 直热式电子枪和间热式电子枪

焊接电子枪都采用热阴极作为电子源。按阴极加热方式不同,可分为直热式阴极和间热式阴极。

直热式阴极是利用流过阴极自身的电流的热效应,加热阴极使其达到热发射电子温度的。该电流可以是直流或交流,也可以是工频交流,或高频交流。而间热式阴极是指利用电子轰击加热阴极,使阴极达到热电子发射状态的。此时,产生轰击电子的阴极通常被称为灯丝(filament)。产生焊接电子束的源泉,即被灯丝电子轰击的靶被称为阴极(Cathode)。就产生电子束的原理而言,采用间热式阴极的电子枪,相当于两级串联的电

子枪。

显然,直热式阴极电子枪的机械和电气结构简单,其缺点是电子束易受阴极加热电流磁场的影响而产生偏摆。同直热式相比,间热式阴极电子枪的结构复杂。但是,可以免受加热电流磁场的影响,电子束稳定性好。同时,采用间热式阴极在阴极结构和阴极材料的选择上可以有更大的余地,从而提高阴极的使用寿命和发射效率。

(3) 二极枪和三极枪

从控制电子束的方式看,有二极电子枪和三极电子枪之分。如前所述的工作在空间电荷限制下的皮尔斯(Pierce)枪,从电子束发生系统的结构看,虽然有3个电极,即阴极、控制极(又称聚束极、栅极或文纳尔极)、阳极,但是,控制极始终和阴极处于同一电位,故属于二极枪。这是早期低压型焊接电子枪中广泛采用的。由于它存在着前已述及的缺点,很快被三极枪所取代。在三极枪中,控制极处于比阴极更负的电位,称为负偏压。利用负偏压可以控制电子束流的导通与截止,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。现代焊接电子枪均采用三极枪。应该说明的是,源于德国,沿袭电子束加工机发展起来的高压型焊接电子枪,则始终采用的是三极枪。

有资料表明,近年来,人们在为解决大厚度焊接而研制的大功率(>100kW)电子枪中,为了消除因焊接金属蒸汽引起的控制极失控问题,有的又采用了二极枪。

2.3.4 按焊接室或功率大小分类

电子束焊机按其焊接真空室的大小,有所谓小型、中型、大型电子束焊机之分。这种分类的概念是相对的,并随电子束焊接技术的发展而变化。在电子束焊接技术发展的早期,人们将主要是用于电子束加工(切割、蒸发、区域真空清理、铣削、钻孔),同时也可用于微型焊接(印刷电路板、微型电路)的电子束加工机也列入小型电子束焊机中。而在电子束焊接已立足于工业生产各领域的今天,所谓小型电子束焊机是指专门设计用于焊接的,其电子枪的技术性能和结构同加工

机有明显差别。再如，一个容积为 5m^3 的焊接室，在上世纪 60 年代中期被认为是特大型的。随着大抽速真空泵的出现，设计和制造大型真空容器水平的提高，到 70 年代所谓大型真空室的容积已经超过了 20m^3 ，80 年代法国 Sciaky 公司生产的 EL10 型电子束焊机，真空室容积已达 265m^3 ，90 年代法国 TECHMETA 公司曾建造了容积达 800m^3 的真空室。据称，前苏联曾建造了容积达 1000m^3 的焊接室。

采用低压电子枪的大型电子束焊机，为了便于焊接，大多采用动枪。而采用高压电子枪的大型电子束焊机，大都采用定枪。在这种情况下，有时电子枪设计有几个安装位置，也有的同时装有 2 支或多支电子枪。

随着电子束焊接构件尺寸的不断增大，人们在不断加大真空室的同时，开发了局部真空(Local Vacuum)电子束焊接技术。当被焊工件整体都处于真空室内时，称为全真空电子束焊接。当被焊工件只是部分处在真空中，其余部分仍处在大气中时，则称为局部真空电子束焊接。局部真空电子束焊接又有两种类型，一种是整个接头都处于真空中，如锅炉联箱管板结构，运载火箭贮箱法兰的焊接(见图 6)。另一种情况是同一条焊缝的施焊处在真空中，而待焊和已焊过部分处于大气中，即采用移动式真空室。

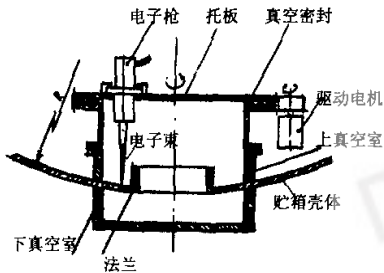


图 6 箱体法兰局部真空电子束焊接示意图

当今，在工业生产中应用的电子束焊机按功率大小，可分为小功率($\leq 3\text{kW}$)、中等功率($6\sim 15\text{kW}$)和大功率($\geq 30\text{kW}$)电子束焊机。据称目前功率达 300kW 的超高压大型电子束焊接设备已

研制成功。

功率大小的选择，主要是考虑使用要求，焊接厚度是其中最主要因素。高功率密度仅是获得深穿透的必要条件，其充分条件是还要有足够大的功率。图 7 给出了对钢而言的焊接深度和电子枪功率的关系。对其它材料也有类似的关系。只是因不同材料的热物理性能不同，对应的具体数值不同而已。例如，在同样功率条件下，焊接铝合金时的穿透深度比钢要大。以相同功率焊接不同合金系的铝合金，其穿透深度也不相同。焊接 Al-Mg 系 LF6 合金时的穿透深度比焊接 Al-Cu 系的 LD10 合金要大。这表明电子束焊接时的深穿透效应，与材料中合金元素的饱和蒸汽压也有着密切关系。

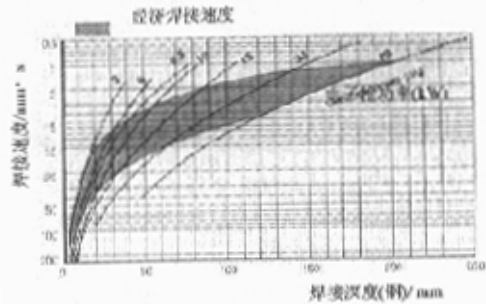


图 7 焊接深度同电子束功率的关系

2.3.5 按用途分类

电子束焊接设备按其用途可分为通用型和专用型。

通用型设备既可以用于研究试验中，也可用于小批量生产中，在工业生产中有很广泛的应用。这类设备的主要缺点是生产效率低，在每一个工作循环中，焊接时间仅占 $2\%\sim 5\%$ ，绝大部分时间都耗费在安装工件、抽真空、充气和取出工件的过程中。在某些情况下，特别是在大批量生产时，这将成为应用电子束焊接的主要障碍。

为了提高生产效率，针对通用型设备，人们采取多种措施。一是在较大的真空室中设计有多工位夹具或贮舱装置，抽一次真空后，可焊接多个工件。二是在小型真空室内配以快速装卸的夹具，每次装进一个工件，但抽空时间很短，适

用于对称的小型零件的低真空焊接。

为了进一步提高生产效率适应大批量生产的需求,出现了各种类型的专用电子束焊机。这类焊机是为适应大批量焊接某种(类)零件而专门设计的,其类型很多。如图8所示为原LEYBOLD-HERAEUS公司为焊接汽车后桥制造的具有双电子枪的专用设备。英国CVE公司制造的CW606型4工位压力变换器专用焊机,原德国Messer公司生产的焊接双金属带用连续焊机都属于这一类。

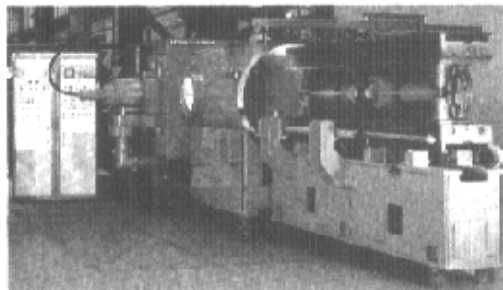


图8 L-H公司焊接汽车后桥专用焊机

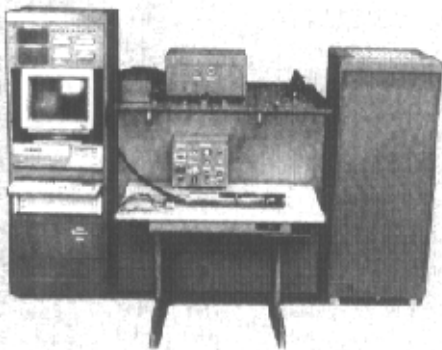


图9 在管内径向焊接管件的电子束设备

为了将电子束焊接的特点应用于管(件)道类零件的焊接,法国Sciaky公司在70年代末开发了以被焊管件作为真空室,在管内焊接对接接头的电子束焊接设备。电子枪的体积,特别是径向尺寸很小,电子束的轴线垂直于被焊管件的轴线。最近,巴东焊接研究所也展示了他们研制的

用于从内部焊接管类对接接头的专用装置,见图9。该装置是三极管型电子枪,额定电压35kV,束流100mA,具有束偏转系统和利用二次电子反射的焊缝跟踪系统及防放电装置。

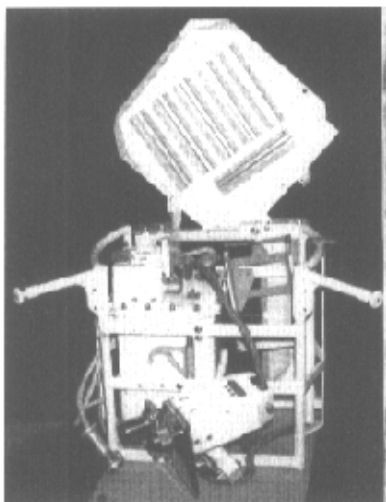


图10 外层空间用手动电子束焊接装置

此外,人类在外层空间活动中,为了装配空间站和维修在轨运行的航天飞行器,开发了用于外层空间的电子束焊接设备。在外层空间,电子束焊接是一种重要的焊接方法。因为外层空间的高真空和失重环境,不仅省略了真空室和复杂的抽空系统,而且电子束具有较高的电-热转换效率,高度集中的能量密度,电子束对熔化金属没有作用力,熔池也很小,对失重不敏感。应用于外层空间的电子束焊接设备必须具备很高的可靠性,对操作人员绝不能有任何伤害。要求体积小、重量轻、能耗低。全部工艺过程应最大限度地自动化,技术参数应有相当高的稳定性和精度,以保证焊接质量的稳定性和可靠性。图10是巴东所研制的可在外层空间进行手动电子束焊接的装置,最大输出功率350W,重量40kg,该装置1984~1986年间曾用在礼炮号(Салют-7)空间站上。

(未完待续)