



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，以饷读者。

电子束焊接技术发展历史、现状及展望 (I)

首都航天机械公司 刘春飞 张益坤

T64 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

1 电子束焊接技术的起源

1.1 电子束的发现

电子束的发现，至今已有 100 多年的历史，还在人们了解电子的性能之前，曾经有过“阴极射线”（cathode-ray）的名称。早在 1879 年 Sir William Crookes 发现在阴极射线管中的铂阳极因被阴极射线轰击而熔化的现象。又过了差不多 20 年，在 1897 年 J. J. Thompson 的研究工作证明，所谓的阴极射线实际就是电子束。到了上个世纪初的 1907 年，Marcello Von Pirani 进一步发现了电子束作为高能量密度热源的可能性，他第一次用电子束做了熔化金属的试验，成功地熔炼了钨。

但是在当时，人们还没有掌握电子运动的规律，只能凭经验通过实践逐步摸索，逐渐认识到电子是物质的最基本的、稳定的荷（负）电粒

子，在所有荷电的物质基本粒子中，电子具有最小的质量，并可以用很简单的方法获得自由状态的电子。

到了上个世纪 20 年代，人们开始认识到轴对称电场和磁场对电子具有聚焦能力，建立了电子光学理论。在这一理论指导下，人们开始有意识地利用电子在电场、磁场中的运动规律，制作了各种电子束器件，使电子束的非热学应用有了飞速发展。对现代科学技术发展有着重要推动作用的示波管及电子示波器、电视发送管（摄像管）、电视接收管（显象管）以及电子显微镜等，都是在那之后，即上个世纪 30 年代后陆续出现的。

1948 年前西德的 K. H. Steigerwald 博士在致力于研究更高工作频率的电子示波器时，发现高功率密度的电子束可以熔化、烧蚀、冲刷金属的现象。在继续深入研究这一现象的基础上，

收稿日期：

他在 1951 年申请了在各种材料上钻孔的电子束设备的专利。1952 年 K·H·Steigerwald 博士在蔡司公司 (zeiss) 制造了第一台电子束加工机。这样,在德国,在电子束的非热学应用迅速发展的同时,电子束的热学应用——电子束加工,包括电子束钻孔、电子束铣削、电子束刻蚀等也得到了迅速发展。其实这些加工机也可以用于焊接,并显示出深穿透效果。但由于战败的德国不能发展核工业,没有在真空中进行焊接的需求牵引,所以电子束焊接在当时的德国并没有引起重视,而电子束加工却得到了长足发展,但这却为后来德国发展高压型电子束焊接奠定了技术基础。

1.2 电子束焊接的出现

大约在 1950 年前后,核能工业的发展促使人们对高熔点金属 (W、Mo、Ta、Nb) 及稀贵金属 (U、Zr、Be) 需求的增加,特别是对锆 (Zr) 及其合金。因为锆具有低的热中子吸收横截面,中子辐照作用对其强度和韧性影响极小。此外,锆同铀燃料具有良好的相容性,因此被称为“原子时代第一号金属”,是用于原子能反应堆的重要结构材料。但是,这些材料在焊接时对大气环境中的氧、氮、氢等气体有很强的亲和力,极易形成化合物,影响接头性能。于是人们采用了钨极惰性气体保护焊,甚至在充满惰性气体的保护箱内焊接这些金属。但是,焊接质量仍然不够稳定,受保护气体纯度影响很大。而在当时,真空技术已经发展到相当水平,真空能提供比惰性气体更“纯净”的保护条件,可是电弧不能在真空中维持。于是,人们在上世纪初就已经知道的在真空中被加速的电子轰击可以作为热源来熔化金属,实现焊接的想法开始付诸实践了。

1954 年在法国原子能委员会 (CEA) 的建议下, J·A·Stohr 博士开始了电子束焊接的研究工作,并于 1957 年在巴黎的原子能国际会议上发表了他的研究报告,介绍了世界上第一台专门用于焊接的电子束焊机。图 1 为该装置的示意图。

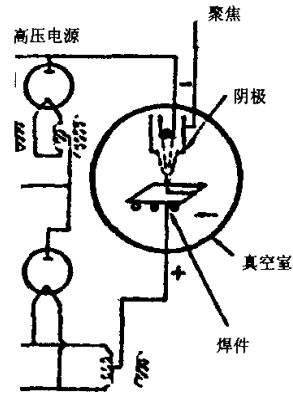


图 1 Stohr 焊机示意图

依照今天的观点看,所用电子枪是比较简陋的二极枪。加速电压仅 15kV,采用静电聚焦,以待焊工件为阳极,阴极和文纳尔 (Wehnelt) 的电位相同。属于皮尔斯 (Pierce) 型二极枪,工件在空间电荷限制条件下。根据查理—朗缪尔公式:

$$I = PV^{3/2}$$

式中:

P——导流系数,与电极的几何参数有关

V——电压

可以看出,电子束流 (I) 是导流系数和高压的函数。因此,调节束流必须调节高压或导流系数,而调节高压又要引起焦点的变化,调节导流系数必须改变阴极、文纳尔同阳极间的距离。所以,这种电子枪用于焊接很不方便。同时,由于采用静电透镜,相对磁透镜而言,各电极与阴极之间有较高的电位差,存在绝缘问题,调节不便。此外,相对磁透镜而言,静电透镜的象差较大,不易获得高质量的电子光学图象。

从实际使用的角度看,这种电子枪存在 3 个主要问题:一是电子束发生系统和焊件处于同一真空室中,焊接过程中的放气影响电子枪工作的稳定性;二是电子束的焦距很短,可达性差;三是电子束功率密度低,深穿透效应不明显。尽管如此,在以解决在真空保护环境里焊接铀、锆、铍等金属为主要目标的当时,这种焊接电子枪可

以达到这一目标，满足这些要求，获得了实际应用。J. A. Stohr 的这一研究成果的重要意义在于不仅使电子束焊接在世界范围内受到关注，而且使熔焊的保护方法从渣保护、气保护，发展到了真空保护——最理想、最完善的保护。这在焊接技术发展史上是具有里程碑意义的事件。同时，J. A. Stohr 提出的焊机为日后发展起来的低压型电子束焊机奠定了技术基础。

从此，电子束焊接作为一种具有理想保护条件的熔化焊接方法引起世人关注。各先进工业国家相继大力开发这一新技术，特别是处于开发核能工业前沿的美国，对这一技术的需求更为迫切。其实，美国在 1956 年就独立开展了研究工作。1958 年 2 月美国的 W. L. Myman 发表了在 Hanford 实验室的研究成果，并介绍了由美国独立研制的电子束焊机（见图 2）。这是一台和 J. A. Stohr 的完全相似的焊机，其加速电压为 15kV，用于焊接难熔金属，包括钨—Z 合金。

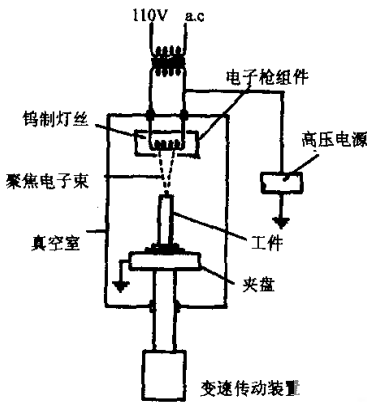


图 2 Wyman 焊机示意图

1958 年底，英国爱德华高真空公司 (Edwards High Vacuum Ltd) 利用 CEA 的生产许可证为英国原子能当局制造了英国的第一批共 3 台真空电子束焊机，其加速电压为 20kV，最大束流 100mA，并采用磁透镜代替静电透镜，改善了聚焦质量。

1958 年 М В Т У—М Э И 研制出前苏联的第一台实验用真空电子束焊接装置 Н. А. О л ь

ш а н с к и й 撰文报道了苏联开展电子束焊接技术的研究成果。

1960 年夏，由日本电子公司为日本科学技术厅所属的金属材料研究所研制了第一台电子束焊机。

可以看出，电子束焊接技术的诞生和最初应用都是和当时核能工业的需求紧密联系着的。这种新技术一出现，立即受到了包括美国、前苏联在内的各先进工业国家高度重视，争相开发。

2 电子束焊接的特点及分类

2.1 电子束的能量转换特点

电子束焊接这一新技术一出现，便受到各先进工业国家制造业的青睐，竞相研究开发，这是和电子束热源的特点密切相关的。电子束焊接是利用在真空中被静电场聚焦并加速的电子束，轰击待焊工件接头处，将电子束的能量施加于工件，熔化材料实现焊接的过程。与以电弧为热源的常规焊接方法相比，在能量传递，热量析出部位和能量转换机理等方面，都有着本质的不同。

电子束焊接时的能量传递是以无任何化学属性的电子束作为载体，以与光速同一数量级的速度穿过真空空间，直接作用于材料，而不需要经过电弧空间的气体。其次，与常规电弧焊时，热量在材料表面上方的阴、阳极斑点和弧柱处析出不同，电子束焊接时热量在被轰击材料表面下的某一薄层下析出，该薄层被称为电子穿透层，见图 3。

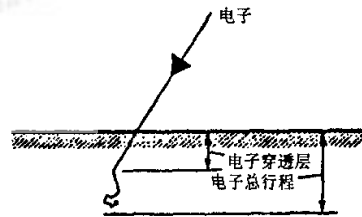


图 3 高能电子轨迹示意图

电子穿透层的厚度与被轰击材料的密度成反比，与电子加速电压的平方成正比，但一般都

很薄,约为数十或数百微米。最后应指出的是能量转换机理不同,常规电弧热源主要是依靠热交换(传导、对流、辐射),而电子撞击到材料表面时,电子将首先穿透电子穿透层,此时电子的动能损失很小,仅有极少部分能量损耗于二次电子发射、X辐射或被弹性散射电子带走(见图4),所以电子对穿透薄层不能进行加热。当电子进入材料内部后,在等于电子行程的那一厚度上,其动能首先转移到晶格电子上去,然后晶格电子再传送振动能量到全部晶格,晶格振荡的振幅因此而增加,这就意味着材料达到非常高的温度,以致可以使材料瞬间熔化和蒸发,实现焊接。能量并不随着电子透入深度均匀释放,而是在行程终端时释放得更快些。这一过程进行得异常迅速,在微秒级内便可完成。

正是这种特殊的能量传递和转换机构赋予电子束焊接有别于其它热源焊接的许多特点。

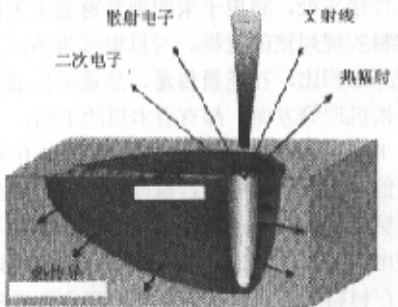


图4 电子束能量转换示意图

2.2 电子束焊接的基本特点

2.2.1 极高的能量密度

电子束的能量密度可达 $10^7 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$,比大功率氩弧高2~4个数量级。同时,电子束特殊的能量转换机构具有很高的能量转换效率。这样不但可以实现高速焊接(每分钟数十米),深穿透焊接(焊接厚度达150mm(钢)和300mm(铝合金),深宽比达50:1),而且焊接时输送到焊件上的总能量和引起的焊接变形几乎比常规弧焊小一个数量级,对材料的热影响也相当小。甚至可以把精加工的零件焊在一起,而不需要焊后加工。

此外,极高的能量密度提供了用电子束焊接任何金属,甚至包括陶瓷等非金属,以及复合材料的可能性。

2.2.2 理想的保护条件

众所周知,焊接技术的发展史是同研究不断改进和完善熔池的保护条件紧密联系着的。电子束焊接大多是在真空中进行的,真空是一种理想的保护环境,对焊缝金属和整个零件几乎没有任何污染。目前真空电子束焊接常用的真空度都在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 托之间,这比工业用一级氩气的纯度要高几个数量级。这样纯净的环境,对熔化金属只有净化、提纯作用,而不会带来任何污染。此外,电子束本身是没有任何化学性质的,通常电子束焊接不需要另外填充材料,从而避免了热源和填充材料带来的污染。

2.2.3 良好的可达性和可控性

在所有的荷电基本粒子中,电子具有最小的质量(其静止质量为 $9.1 \times 10^{-28} \text{ g}$),很高的荷质比($1.74 \times 10^8 \text{ C/g}$),可以几乎无惯性的受到电场或磁场的控制。这样就使得电子束在目前已知的各种焊接热源中,成为一种最容易操纵的热源,它允许在很宽的范围内调节输送到工件上的热量,很精确地施加到接头处,并能在很大的距离(数十毫米到上千毫米)内输送能量。这样就可以对复杂零件不易接近部位、可达性差的接头进行焊接,也可焊接某些空间焊缝或遮挡焊缝(多层焊缝)。

此外,电子束的功率和焦点直径都可以精确调整,这样其功率密度便可根据需要很方便地进行调节,既可以散焦在较大的面积上进行焊前预热或清理,也可以聚焦在很小的面积上实现精密焊接甚至切割,这是常规焊接热源无法实现的。

近年来随着电子束偏转技术的发展,在焊接电子束以极高的频率进行扫描的同时,人们可以对电子束的焦点位置和功率分布进行控制,这就允许同时在一个焊件上施焊多条焊缝。这是连采用激光束也很难实现的,进一步显示出电子束焊接良好的可达性和可控性。(未完待续)