



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，以飨读者。

电子束焊接技术发展历史、现状及展望（III）

首都航天机械公司 刘春飞 张益坤

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

TGA B

3 国外电子束焊接技术发展情况

3.1 电子束焊接技术发展阶段

3.1.1 早期阶段（20世纪50~60年代）

这是电子束焊接走出实验室跨进制造业，发展成为特种焊接制造技术的阶段。

由于上世纪50年代核能工业发展的需求，特别是J·A·Stohr在低压型真空电子束装置上焊接铝燃料套管的成功，显示了电子束焊接作为实用工业制造技术的巨大潜力之后，引起了各先进工业国家，特别是当时正处于大力发展航天航空技术初期阶段的美、苏及英、法等国的高度重视。但是，在电子束焊接技术发展史上的这个阶段，人们主要关心的是这一焊接新方法，能在真空环境下焊接过去不能焊接或难以焊接的金属材料，并能获得优质焊缝。早期，主要是应用于原子能工业中，随后是在航空发动机工业中。当时对设备的操作性考虑很少，甚至对抽真空时间长短也不很在意，很少注意到整个过程的经济性。

再加上电子束焊接设备价格昂贵，只能用于所谓尖端工业，即当时正在蓬勃兴起的原子能、航空、航天和电子工业等对焊接有特殊要求的部门。这一时期设备正处于从实验室装置向生产型设备转变的阶段。大多为通用型，但尚能适应单件、少量生产的要求。设备稳定性、可靠性差，调整操作对人员依赖性很大，但尚能适应特殊材料、精密零件焊接要求。重要的是电子束焊接技术从实验室走进了制造业，电子束焊接设备从一种电真空物理装置发展成为工业生产设备。

3.1.2 中期阶段（20世纪70~80年代）

这是电子束焊接技术从尖端产品制造业向一般通用产品制造业迅速推广普及的阶段。电子束焊接技术在这个阶段解决了设备的稳定性、可靠性问题，也解决了生产效率问题。

进入20世纪70年代，随着电子束焊接技术日趋成熟，电子束焊接设备的稳定性和操作过程自动化程度的提高，以及当时机械制造业技术改造的需求，使电子束焊接技术不仅牢固立足于尖

端工业中,而且迅速普及扩大到一般机械制造业,特别是在大批量生产行业(汽车、轴承、工具制造业)获得了迅速推广应用。例如,1966年日本富士重工首先用电子束焊接汽车变速箱齿轮。1967年美国通用汽车公司用电子束焊接了发动机中的飞轮和齿环。到70年代中期,世界各大汽车公司都先后引进了电子束焊接技术。据统计,到1974年仅美国汽车工业就拥有80台电子束焊机在运行。

电子束焊接所以能迅速进入一般制造业,主要原因是电子束焊接具有常规焊接方法无法比拟的技术经济效果。这些效果主要源于从电子束焊接的基本特点所衍生出的下列优点:

(1) 极小的焊接变形,可以连接精加工零件,焊后无需再加工;

(2) 对焊件的冶金影响很小,可以焊接常规方法不能焊接的材料,充分发挥不同材料各自的特点;

(3) 可以实现特殊接头或特殊位置的焊接,这就为实现新型设计方案创造了条件,可节省材料,简化加工过程,降低成本;

(4) 在设计大批量生产线时,电子束焊接可以有很高的生产效率;

(5) 电子束焊接的全部参数都是最容易实现精确控制的电参数,易于在生产线上实现焊接自动化和全过程的自动化。

这一阶段随着基础工业水平的提高和科学技术进步,电子束焊接设备在提高整机运行的稳定性和可靠性;解决束流功率和聚焦的长时间工作稳定性;真空系统的快速抽空和程序控制;电源及电控系统的可靠性进一步提高;机械传动装置功能的完善等方面都取得了巨大进步。与此同时,焊接各类产品的,可以运行在生产线上的各种高效专用电子束焊接设备不断涌现。有资料表明,在这一时期生产的电子束焊机大约80%是专用型的。电子束焊接极高的生产效率适应了当时正处于腾飞阶段的世界经济发展的需求,显著的经济效益使电子束焊接在竞争剧烈的民用工业部门也显示出了强大的竞争力。

在这一阶段,对电子束焊接基础理论和应用基础的研究也取得了许多富有实用意义的成果。例如电子束和金属的作用过程、束孔的形成和熔化金属的动态特性;电子束焦点直径、位置和能量密度分布的测定;电子束焊接特有缺陷的研究;针对薄板高速电子束焊接时成型不良和厚板焊接时产生“钉尖”缺陷等问题,开展了串接双束电子束焊接(Tandem electron beam welding)技术研究;各种材料的电子束焊接性研究;以及高功率电子束和大厚度材料焊接等方面的深入研究。这些成果既为电子束焊接技术的推广应用奠定了理论技术基础,又为其发展指出了方向。

3.1.3 成熟和持续发展阶段

到上世纪80年代末90年代初,电子束焊接进入了成熟和平稳发展期。全球的电子束焊机的保有量已达4000台。

电子束焊接在中期阶段的蓬勃发展和广泛推广应用过程中,也出现了一股“电子束热”,“随意”采用电子束焊接,结果很不理想。例如,有资料表明焊接厚度大于100mm的构件,电子束焊接成本仅为其它焊接方法的50%~70%。于是一些国家在对开发中可能出现的技术问题估计不足,对在生产应用中可能遇到的问题也没有充分准备的情况下,便竞相开发高功率($\geq 100\text{kW}$)电子束焊机。尤其是日本,研制了17台,但在生产中使用的仅2~3台。引起了人们的深思。

从上世纪80年代末期开始,电子束焊接技术进入了成熟和持续发展阶段。尽管一些厂家从电子束焊接设备制造界退出,电子束焊接技术向制造业各领域的渗透、扩散势头有所减缓,表明电子束焊接技术已进入成熟期,同时电子束焊接技术仍在持续发展。一是不断吸收、利用这一阶段各种新技术的最新成果;二是发挥电子束深穿透的特点,继续向大型、大厚度重型结构的焊接进军。

从上世纪80年代末以来,电子枪设计和试验技术有了新进展;设备配置水平有了新提高,电子枪普遍配置了涡轮分子泵,高频逆变开关式

高压电源代替了中频机组；特别是这一阶段电子技术、计算机技术和自动控制技术的新成果几乎都在电子束焊接技术中得到了应用和体现。普遍采用了 PLC 和 CNC 控制系统，可以实现包括逻辑程序、焊接参数及运动等全部过程的自动控制和监测；多种形式的焊接对中和焊缝跟踪系统，设备故障自诊断系统；有的还可向用户提供加工基本软件和电子束专家管理系统等软件包。

这个阶段，电子束焊接以其精密焊接的特点在继续向制造业的各个领域渗透扩散的同时，又在充分发挥其深穿透的特点向大型大厚度重型零件的焊接领域进军。在研发超大型真空室（数百甚至上千立方米），开发高功率（ $\geq 100\text{kW}$ ， $> 150\text{kV}$ ）电子枪和电源，实现大厚件非真空电子束焊接的工程应用等方面都取得很大进展。

进入 21 世纪，随着人类活动空间向太空的进一步扩展，电子束焊接技术的应用也将从地面扩展到太空。电子束技术在空间结构焊接和加工中的作用将为人们进一步认识和发展，并将发挥重要作用。

3.2 各国发展概况

3.2.1 美国

美国是最早开发应用电子束焊接技术的国家之一，也是电子束焊接的最大用户。有资料显示，全世界电子束焊机拥有量的 50% 都集中在美国。1958 年美国西屋公司（Westinghouse）研制成功了 150kV 高真空电子束焊机，1959 年美国联合飞机公司（Consolidated Aircraft Corporation）也生产了第一台焊机。

1961 年美国哈密尔顿（Hamilton）公司引进西德蔡司（Carl Zeiss）公司的技术，1963 年又全部买进蔡司专利，在世界范围内取得了电子束焊机的制造和销售权，随后又于 1964 年和 1966 年同英国的霍克西德利（Hawker Siddeley）公司，德国赫劳斯（Heraeus）公司，日本电气公司（NEC）签订技术协议，根据蔡司公司的专利生产高压型焊机，直到 1976 年哈密尔顿从电子束焊机制造界退出，由德国莱宝公司（Leybold）继承其业务，继续生产高压型电子束焊机。这是世界上最大的高

压型电子束焊机的生产集团。

在此期间，位于芝加哥的美国西雅基（Sciaky）兄弟公司则在从事低压型电子束焊机的研发和销售，它与在巴黎的法国西雅基公司一起成为当时世界最大的低压型电子束焊机的生产商，并成为美国国防工业最大的电子束焊接设备供应商，为各大航空公司提供了许多大型真空电子束焊机，且多为内置动枪式。

在美国电子束焊接的第一大用户是航空航天制造业（约占 30%），其次是原子能和汽车工业（约占 20%）。

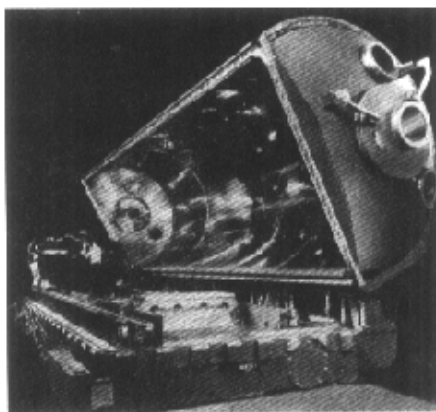


图 11 蛤形电子束焊机

(Sciaky 上世纪 60 年代末生产)

早在 1961 年格鲁曼（Grumman）航空工程公司就开始研究应用电子束焊接，并先后安装了 3 台电子束焊机。1971 年又安装了由美国西雅基（Sciaky）公司制造的 2 台号称具有当时世界上最大真空室的数字控制的大型动枪式电子束焊机，用于焊接 F-14 型歼击机的钛合金机翼箱型结构件。其中一台为蛤形真空室（长 9860mm、高 2440mm、宽 3150mm）（图 11），另台为矩形真空室（长 7670mm、高 3350mm、宽 2740mm）功率各为 30kW（60kV、500mA）。焊机装备有 3 把各为 30kW 可交替使用的电子枪。电子枪装在真空室内钢架的滑动装置上，可沿 3 个轴移动，并可在 X 和 Y 轴上旋转。焊机的数字读出装置

可连续显示出电子枪的 X、Y、Z 轴坐标位置,电子束的对中通过电视光学系统,摄像机直接摄取束流斑点的图象并显示在控制台的大型视频监视器上。有资料显示,从 60 年代中期到 70 年代中期的 10 年间,格鲁曼公司仅安装西雅基的电子束焊机就达 8 台之多。

美国航天飞机主发动机是推力为 200t 的大型氢氧发动机。由洛克韦尔国际公司 (Rockwell International) 洛克达因(Rockdane)分公司负责研制,到 1975 年该公司就已安装了 7 台电子束焊机,后因研制航天飞机的需要又安装第 8 台。这是由西雅基公司生产的功率为 42kW,由计算机控制的大型真空电子束焊机。洛克达因公司曾宣称,电子束焊接帮助他们制造了能满足多次重复使用要求的航天飞机主发动机。

美国对局部真空电子束焊接的应用也很早。在研制阿波罗宇宙飞船时,其一级运载火箭上的直径为 10m 的“Y”形环的焊接,就是一个在大型构件上应用局部真空电子束焊接的实例。“Y”形环的材料为 2219 铝合金,断面尺寸为 139.7mm×68.58mm,是由 3 个弧段拼焊而成,用局部真空电子束焊接代替熔化极氩弧焊,焊缝层数从 100 层减至 2 层,装配和焊接时间从 80h 减少到 8h,焊缝强度系数从 50% 提高到 75%,不仅经济效果好,而且接头质量高。

美国还是世界上非真空电子束焊接的最大用户。有资料表明,上世纪 80 年代在美国已经有 50 台非真空电子束焊机在运行,其中包括从欧洲引进的设备,主要是用于汽车制造业中。而当时在欧洲还仅限于实验室中,尽管有些设备已出口美国,但并没有受到欧洲用户的重视。

电子束焊接设备在美国曾一度成为热门产业。早在 1964 年就有 7 个厂家生产电子束焊接设备,到 70 年代鼎盛时期生产厂家多达 16 家。后来,随着市场趋于饱和,多数厂家都日渐退出。但是,美国西雅基公司多年来在继续致力于开发精密弧焊技术、电阻焊接技术和激光焊接技术的同时,仍然在坚持开发销售电子束焊接设备。除装备世界上许多大型航空制造企业外,还装备了

许多汽车制造厂家。我国曾在上世纪 80 年代末引进该公司的 CV3-136×24×32 型双枪电子束焊机,用以焊接重型卡车后桥。近年来,该公司又推出了用 W2000 电脑控制的、可多轴连动的低压(60kV)内置动枪式(图 12)电子束焊机,150kV 的高压定枪电子束焊机,还可根据用户需求提供成套服务。美国西雅基公司 1985 年被 Ferranti International 公司收购,成为其下属子公司,名为 Ferranti Sciaky 公司。据悉,1994 年又被 PSI 公司收购。

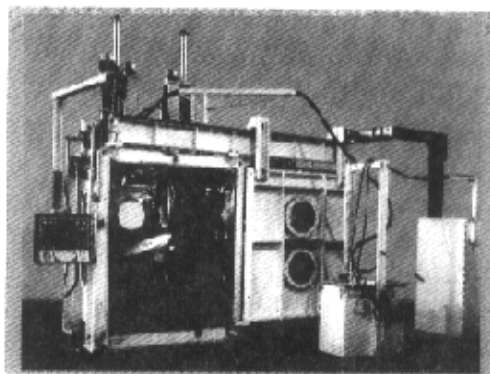


图 12 W2000 电脑控制的电子束焊机
(Ferranti Sciaky 上世纪 90 年代末生产)

3.2.2 前苏联(含俄罗斯、乌克兰)

早在 1958 年,前苏联乌克兰科学院巴东焊接研究所就研制出了前苏联的第 1 台实验用电子束焊接装置。1959 年包曼高等技术学校和巴东焊接研究所陆续发表了有关电子束焊接技术的研究报告。此后,前苏联在电子束焊接设备、工艺、基础理论研究和试验方法等方面持续开展大量工作,并研制成功一批用于仪器仪表零件焊接的小型通用或专用电子束焊机,如 Y-3、A306-02、A305-05 等,均为低压型(20~25kV)。

60 年代初,巴东所又和苏姆柯(Сумск и я)工厂合作研制了前苏联第 1 台大型电子束焊机 У-86,真空室容积超过 10m³(Φ2m×4m),材料为厚 20mm 的不锈钢,功率达 15kW(30kV、500mA),在 20~25min 可抽空到 1×10⁻¹Pa。

1973 年在美国举行的航空工业设备展览会上,前苏联展示了近 10 种规格的电子束焊接设备或有关技术资料,其中包括可焊 $\Phi 3000\text{mm}$ 环形焊缝的 GIY-13 大型电子束焊机。

前苏联的电子束焊接设备多为 30kV 或 60kV 的低压型。 ЭЛ А 60/60 型高压电源(60kW、60kV)得到了广泛应用,该电源带有放电保护装置,可有效抑制高压放电。电子枪有直热式和间热式。间热式采用硼化镧(LaB6)阴极,具有发射效率高,使用寿命长等优点,有专门厂家生产,直径有 3.0mm、4.2mm、4.75mm 等多种。低压电子枪工作距离短,一般在 50~200mm,多用于动枪。

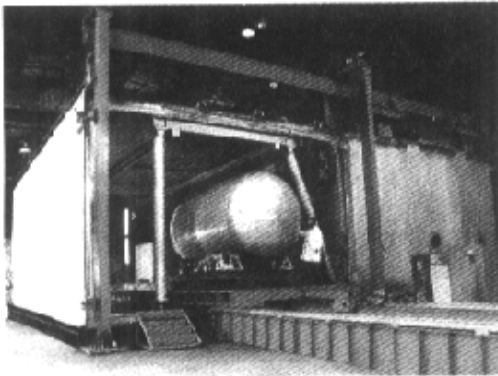


图 13 YЛ-193 型电子束焊机

(巴东焊接研究所上世纪 80 年代研制真空室材料为混凝土聚合物)

前苏联电子束焊接的最大用户是航空航天工业,据称,到 1990 年在前苏联航天部门共拥有近 200 台电子束焊机。为了焊接大型航天构件,建造了大型真空室。例如焊接“能源号”发动机喷管环形焊缝的真空室 $\Phi 4.2\text{m} \times 8\text{m}$,容积超过 110m^3 。巴东所在上世纪 80 年代建造的 YЛ-193 型焊机的真空室达 450m^3 (图 13),用聚合材料制成,内外壁均涂敷专用涂料。此外,为解决大型构件的焊接问题,前苏联还开发了局部真空电子束焊接技术。有两种类型,一种是用于焊接圆筒壳段纵向焊缝或环向焊缝。例如“能源号”一级 8m 直径的贮箱壳段,由 3 块长 8.4m、高 2.1m、厚 42mm 的板壳通过 3 条纵向焊缝连接而成,采

用了局部真空电子束垂直向上焊,一次焊接成型;另一种用于焊接壳段上法蓝的圆焊缝(图 6),如 YGPAC-170 型。局部真空装置采用了铁磁性的金属氧化物组成,其中硅油作为铁磁体的分散媒,而金属氧化物则是细小磁铁矿颗粒。

前苏联为适应开发建造空间站的需要,在开发外层空间电子束焊接技术方面也取得了许多成果(图 10),居于世界先进水平。

但是,前苏联市场经济不发达,电子技术和计算机技术相对落后,所以总体上讲,设备可靠性差,自动化程度低。我国从上世纪 80 年代末期曾陆续引进多台前苏联(俄、乌)电子束焊接设备,由于设备商品化程度低,对方履约能力差,给用户造成很大困难。近年来,俄罗斯和乌克兰在提高设备的可靠性和商品化程度方面取得了很大成绩。

建立于 1934 年的巴东焊接研究所,一直是前苏联和乌克兰的焊接技术研究中心,在世界享有盛誉,在电子束焊接领域取得过具有世界先进水平的科技成果。特别是 1993 年巴东所与该所的电子束焊接部成立了 Tehnoluch 股份有限公司以后,各方面都取得了新成果。Tehnoluch 公司可以向顾客提供真空室容积从 0.1m^3 到数百立方米,功率从 3kW~120kW,电压 60kV 和 120kV 且具有防高压放电装置电子束焊机,还可以提供焊接金属带的连续型焊机,带有局部真空室或移动真空室的局部真空电子束焊接装置。据称,这些焊机都配备有 CNC+PC 系统以控制整个焊接过程和运动参数;基于用电子束探针扫描焊件表面获得的二次电子信息,实现焊缝实时跟踪和观察系统,以及焊机故障的自诊断系统。Tehnoluch 还提供电子束焊接的技术诀窍,例如用衰减电子束无缺陷焊接 200mm 厚低碳钢。Tehnoluch 还可以提供电子束熔炼炉和电子束镀膜设备。

近年来,俄、乌对开发多功能综合型电子束加工技术和设备亦为重视,并取得了很多成果。

(未完待续)