



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（V）

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

4 我国电子束焊接技术发展概况

4.1 早期研发

我国是世界上最早开发电子束焊机的国家之一。早在 1958 年便开始了电子束焊机的研究和试制工作，1960 年上海电焊机厂在已试制成功真空系统及高压整流电源的基础上，与清华大学合作，进一步提高电子枪的发射电流和电子束的聚焦质量，研制成功我国第一台真空电子束焊机，型号 ZD-30，电压 15kV，束流 200mA，焦点直径 2-5mm，采用直热式阴极的定枪结构，阴极系用直径 0.5mm 钨丝绕成直径 6mm 的盘香状。该焊机于当年通过国家鉴定，定型为 ZD-6，先后生产了十余台。后来，该型焊机又进行改进，电压升为 22kV 最高可达 30kV，阴极改为钽片，并为我国核工业生产了第一台专用型电子束焊机，型号定为 ZD-6-1 型。1965 年又研制成功 ES-30/250 型（即 ZD-7.5 型）真空电子束焊机（30kV，250mA，7.5kW），采用间热式阴极，移动式电子枪结构，到 1975 年陆续生产了 20 台左右，后来还研制了 ES-3-1 型大真空室电子束焊机。在此期间，我国的高等院校和研究所也纷纷开展电子束焊接设备和工艺的研究工作，取得

了许多成果，对保证我国原子能工业的发展、满足航空工业研制的需要，发挥了重要作用。

但是，这一阶段的设备存在许多问题，电子枪工作不稳定，重复性差，高压电源稳定性差，无焊缝观察装置，绝缘装置不良，容易击穿放电，设备自动化程度很差，操作困难，因此无力深入开展焊接工艺研究。

4.2 中期攻关

上世纪 70 年代中期，电子束在国外已开始一般在机械制造业、汽车、工具、发电设备等民用工业中大量推广应用。国内形势的发展变化，对电子束焊接的需求也进一步增加。当时的一机部系统制定的 1976-1985 年机械工业科学技术发展规划要点，把电子束焊接技术作为重要推广的项目之一。曾设想分两步走，第一步着重解决低、中、高压型真空电子束焊接技术，使其稳定地用于工业生产。通用真空电子束焊机作为系列产品，在汽车、发电设备、工具、轴承等制造行业推广应用。第二步，重点解决局部真空和非真空电子束焊接技术，试制相应设备，并逐步定型，扩大应用范围，着重解决大型构件和特种材料的焊接，赶上世界先进行列。为此，一机部曾安排了中压电子枪攻关计划，成立了由成都焊接研究所负责，

收稿日期：2003-09-30

48

有上海电焊机厂等7个单位参加的攻关组,对关键技术进行集体攻关,对关键零部件和配套装置组织定点生产,并加强电子束基础理论研究,在电子枪设计计算、电子枪性能参数测试等方面开展研究工作。

航空系统对发展电子束焊接技术亦十分重视,据统计,到1973年三机部有电子束焊机18台,但用于生产的只有2~3台,主要问题是电子枪和高压电源不稳定。在1974年法国工业展览会期间,曾组织有关单位进行参观座谈,会后三机部组织了攻关组,分工由625所负责电子枪攻关,120厂负责高压电源稳定性攻关,410厂负责聚焦和束流稳定性攻关。后来,为解决各单位研制中普遍存在的诸如电子枪工作稳定性差等问题,还组织了以625所为主,航空系统410厂、120厂、331厂等单位参加的攻关组。

这些工作取得了一定的效果,对在我国传播、推广电子束焊接技术,培养电子束焊接技术队伍发挥了重要作用。

在此期间,中科院电工所研制成功SD0.2/50型低真空电子束焊机。该焊机配备有真空系统控制装置,该装置包括真空连续测量和阀门程序控制两部分,可根据不同真空状态和焊接要求,自动实现各阀门和真空泵的程序操作。

一机部桂林电科所在此期间研制成功了HDZ-6型高真空中压型电子束焊机(60kV,6kW),满功率焊深20mm(18-8型不锈钢),深宽比15:1。该设备采用硅堆整流,可控硅调压,电子枪横向往复插入。在电子枪结构和电气设计方面采取的多项措施,使该设备初步解决了国内电子枪稳定性、重复性差,焊接质量不稳定以及X射线泄漏等问题,在我国航天型号研制生产中发挥了重要作用。在1977年的技术鉴定会上,被认为代表了我国当时电子束焊接设备的最高水平。

1984年上海电焊机厂引进法国西雅基图纸,生产了F01型中压电子束焊机,该焊机电子枪采用涡轮分子泵,高低真空两用。成焊所研制成功DGP-1型电子束焊缝跟踪偏摆仪。该装置采用单板机,在自动跟踪焊缝的同时可摆动电子束,搅拌熔池,消除焊接缺陷,改善焊缝成型。航天部510所研制成功了直线型局部真空电子束焊接装置,并获国家科技进步三等奖。

4.3 80年代后的快速发展

进入上世纪80年代之后,随着改革开放和国民经济的持续发展,对电子束焊接技术需求的不断增加,促进了电子束焊接设备和工艺的快速发展。

70年代许多单位研制电子束焊接设备,主要

是为了满足自身科研或生产的需求,形成了遍地开花的局面。进入80年代,特别是国家明确提出建立市场经济之后,这种局面有利根本性改观。电子束焊接设备的研制主要是为满足市场需求,为用户提供商品电子束焊接设备。设备研制逐渐集中到少数具有相对完整配套的技术力量和研发能力的单位。目前,国内设备研发实力较为突出的当属航空部625所,机械部桂林电科所和中科院电气高公司。

(1) 航空部625所从事电子束焊接工艺和设备研究已有40余年历史。上世纪80年代初研制的ZD-501型电子束焊机,用于焊接航空仪表、膜盒、传感器类零件,首台曾出口到罗马尼亚,开创我国出口电子束焊机之先河。80年代末研制的双工位ZD-5040C型齿轮电子束焊机,全部程序自动控制,焊接参数数字显示,单件焊接周期不超过90秒。

根据航空发动机零件焊接的需要,625所采取引进部分关键部件(电子枪、高压电源、电气控制系统),以我为主,配套研制的方案,1985年研制了GDH-15型高压电子束焊机,开创了既引进国外先进技术,又发挥国内科研优势,实现上水平的新路子,在国内引起较大反响。

上世纪90年代初,在进一步国产化的基础上研制成功了ZD150-15A大型高压电子束焊机(图19),除高压电源从西德引进外,全部立足于国内研制。研制过程中曾邀请西德电子束专家K·H·Stelgerwald博士进行技术指导。该机加速电压120~150kV,束流100mA,真空室容积3m×1.5m×2m,可焊接厚度0.3~60mm(不锈钢),深宽比可达25:1。电子枪采用双绝缘子,电子光学系统采用双聚焦线圈,电子束工作距离可达1500mm。焊机的程序控制采用可编程控制器。该焊机的研制成功,标志着我国大型高压型真空电子束焊机的研制水平达到了一个新的高度。



图19 ZD150-15A型真空电子束焊机

(2) 机械部桂林电气科学研究所(简称桂林电科所)开发电子束焊接技术始于上世纪70年代初,起步并不早,但由于有雄厚的理论和技术基础,配套齐全的技术队伍和经验丰富的高水平的专业技术带头人,所以涉猎电子束焊接领域后,很快就取得了丰硕成果。

桂林电科所在70年代研制成功第一台HDZ-6型真空电子束焊机的基础上,又相继开发了HDZ系列各种功率的中压型电子束焊接设备,全部采用三极枪,较小功率的采用直热式钨带阴极,较大功率的HDZ-30型则采用间热式阴极,阴极材料为钽块,用钨带灯丝轰击加热,HDZ系列电子枪为焊接室外置枪,可在X方向移动,电子束焦距80~400mm,并可作±3°固定偏转或扫描。HDZ系列的电气控制系统实现了程序控制,包括真空程控,焊接过程控制,工作台数控、工艺参数实时打印输出等。

进入90年代之后,桂林电科所为核工业研制了可连续焊接核燃料板型元件组件的HDZ-10C(图20)型电子束焊机,采用STD总线各功能控制模板为主体构成的控制系统,可以一次完成40条,每条长1400mm的焊缝。1998年,电科所从国外引进电子枪和电源,由国内总体设计配套制造,研制成功了国内第一条金属带材连续焊接生产线。

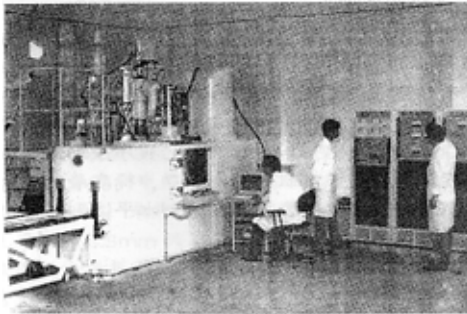


图20 HDZ-10C型电子束焊机

(3) 中科院电气高技术公司针对汽车行业的需要,于上世纪80年代中期研制了EBW-4G型齿轮专用低真空电子束焊机(4kW, 50kW)。该机采用中频机组供电,具有稳定度高,纹波小,抗干扰能力强的特点,适合在环境较差,电网不稳定及长期连续运行的场合下应用。焊接室尺寸为260mm×170mm×390mm,焊接齿轮最

大直径150mm,最大焊缝直径80mm,焊接深度6mm,生产率可达每小时30件。该机作为我国第一代用于大批量生产线的专用机,经受了长时间连续生产的考验,于1988年通过了鉴定。经过十几年的发展,现已形成EBW-G系列齿轮电子束焊机,并曾获国际博览会金奖和各种科技成果奖,占据了国内汽车齿轮焊机市场的大半江山。

电气高公司研制的EBW-4C,是采用PLC控制的中压小型通用型低真空电子束焊机,可配置X、Y、Z工作台和Z、X旋转卡盘,并有电子束扫描系统。1999年电气高公司为上海通用汽车公司生产的液力扭变器涡轮组件专用电子束焊机EBW-6T(图21)投入生产运行,该焊机可在70秒内完成2条端面圆焊缝的焊接。

据称,自1987年以来,电气高公司已为市场提供了50多台各种规格的电子束焊接设备,并从2000年开始出口国外。

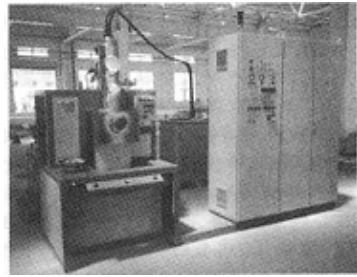


图21 EBW-6T专用型焊机

值得注意的是近年来,我国的民营企业也开始进军电子束焊接设备制造行列,位于桂林高新技术开发区的桂林狮达机电技术工程有限公司即是一例。该公司是专业生产电子束设备的技术工程公司。凭借其灵活的民营机制,快速市场反应能力,全方位的周到服务,使其产品很快就打入我国航天、航空、核工业和汽车等制造业,形成了THDW系列电子束焊机产品。特别令人关注的是狮达公司于2000年在国内首家开发出高频逆变开关电源,同以往常用的可控硅、中频机组电源相比,它具有体积小、反应速度快、控制方便、纹波系数小、稳定性好等特点。这也是近年来国外先进电子束焊接设备竞相采用的新型电源。

同前述的国有电子束焊接设备制造单位相

比,民营企业无论在规模或财力方面都还显得很弱小,但是在追求产品创新,以市场需求为导向和全方位服务等方面,具有很大的竞争优势和发展空间,而这些都是对用户颇具吸引力的。图22是狮达公司生产的THDW-9型电子束焊机,额定功率9kW(60kW,150mA),焊接18-8型不锈钢最大深度可达35mm。

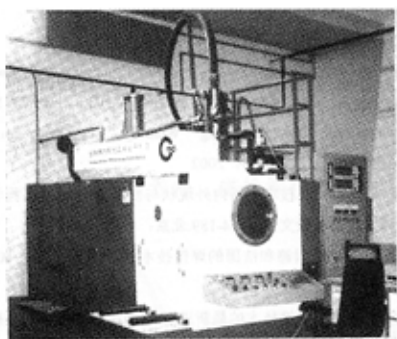


图22 THDW-9型电子束焊机

这一期间,国内在电子束焊接基础理论和应用研究方面也做了大量工作。包括电子束与材料的相互作用,电子束热源的加热特点和熔池的动态特性,电子束能量密度分布,束斑品质特性研究,各种材料在电子束焊接时的可焊性研究等。为了在工业生产中应用、推广电子束焊接技术,80年代中期航天、航空和电子等行业先后陆续制定了电子束焊接的行业标准,90年代中期又制定并颁布了电子束焊接的国家军用标准(GJB1718)。这些技术成果,既为研制高性能、高可靠性的电子束焊接设备提供了方向和目标,又为提高焊接质量,减少焊接缺陷,扩大电子束焊接的应用创造了条件。目前我国电子束焊接设备的保有量已超过100台,主要分布在航天、航空、汽车、核能和电子等行业,且大部分应用在生产中。

5 展望与建议

5.1 电子束焊接技术展望

在过去的半个世纪,电子束焊接走出了实验室,发展成为一种成熟、可靠的先进制造技术,牢固立足于制造业的众多领域,在国外航空、航天、核能、动力、机械、汽车、电子及医疗器械等众多制造行业发挥了重要作用,特别是在大批量生产、大厚度焊接,以及复杂、特殊构件的焊

接中,显示出独特的优越性。

进入21世纪,尽管电子束焊接技术向制造业各行业渗透扩散的势头有所趋缓,但是,在高科技产品和现代运载工具为代表的前沿工程科技需求的牵引下,在不断吸收真空技术、电子光学理论、精密机械、高(电)压技术、自动化技术、特别是计算机技术、微电子技术和通信技术的最新成果的基础上,电子束焊接技术仍将在不断创新中获得持续发展,并将在以下几个方面取得新的进展和突破:

(1) 大功率高能密度电子束焊接装置的研制开发,其关键技术是大功率电子枪和高压电源的研制,以及在工程应用条件下运行的可靠性、稳定性、经济性。

(2) 对电子束流品质特性的进一步深入研究,电子束与材料的交互作用机理、熔池动力学过程的研究探索将继续深入,不断为解决大功率厚板(超厚板)电子束焊接,提高接头质量奠定技术基础。

(3) 大厚度(真空、非真空)电子束焊接技术应用研究,在可预见到的未来,在焊接大厚度构件的深穿透能力方面,还没有其它热源能和电子束相比。但是,目前在工业生产中应用电子束焊接大厚度构件,还存在着许多技术问题(包括工艺、质量检查与测定、缺陷修复技术),这些问题都将陆续获得解决。

(4) 电子束焊接技术将继续与计算机技术和自动化技术集成,提高设备的智能化、柔性化程度。开发电子束焊接应用软件、开展电子束焊接过程的信息检测与控制技术研究,进行焊接过程的模拟和计算等,将继续吸引着更多的焊接工作者进行深入探索和研究,并将有更多成果问世,推动着电子束焊接技术的持续创新。

5.2 几点建议

在改革开放和市场经济推动下,我国电子束焊接技术获得了长足的进步,基本摆脱了长期为设备稳定性、可靠性所困扰的局面,进入了工程应用阶段。但是,同国外发达国家相比,还存在较大的差距。种种信息表明,随着我国加入WTO,在今后10年我国将逐步发展成为全球制造中心,我国制造业面临着实现信息化和用先进、实用技术装备自己的任务。这既为发展我国电子束焊接技术提供了广阔的空间,同时也面临着严峻的挑战。为了迎接加入WTO的挑战,进一步加快发展我国的电子束焊接技术,提出如下建议:

(1) 以产品设计创新为龙头,开拓扩展电子

束焊接应用的新领域。电子束焊接不仅是一种高效可靠的连接方法,而且有可能实现新的设计思想,达到节省材料、简化工艺、降低成本和实现绿色制造的目的。因此,应以产品设计创新为龙头,将电子束焊接从航天航空发动机系统向(导)弹(火)箭体结构和飞机结构扩展;在汽车行业要突破主要困于齿轮焊接的现状;在机床行业,电子束焊接可以在以焊代铸、以焊代锻,以焊代替切割的新型结构中发挥重要作用。在高参数的电站锅炉和石油化工的厚壁容器、高压阀体以及重型机械的大型齿轮制造中,深穿透的电子束焊接可能是最佳选择。在医疗器械和精密仪表制造中的异种材料,精密结构、微细焊接和特殊要求(温度、真空等),以及金属加工中异种材料的板材和带材生产中,电子束焊接都有着广阔的应用前景,在国外不乏成功的先例。但是,我们在应用这一先进技术时,一定要对整个产品工艺流程进行技术经济分析,科学论证。为了在市场竞争中取胜,而不是为了攀比而应用新技术。

(2) 采取扶植政策,支持设备研发。电子束焊接技术属制造技术,其本身就是设备和工艺的结合,电子束焊接技术的推广应用以设备为前提。我国目前稳定用于生产的设备多为进口,国产设备仅在汽车齿轮焊接生产中占有较大比重。目前国内电子束焊接设备研发能力较强的单位,还无一能与国外同行企业相比。我国作为全球制造中心,电子束焊接设备不可能全部依赖进口。因此,研发单位应抓住这一机遇,加速自身的发展和改造。同时,国家应采取扶植政策,(包括改善法律环境,予以政策性金融支持,改进生产型增值税以利于国产设备的研制等)支持设备研制开发,因为电子束焊接设备涉及技术领域广,所需配套、协作单位多,技术含量高,研发周期长,投入大,特别是对用于国防军工生产的大型高压高精度设备的研发。同时,还应引导企业合理分工,有序竞争,组织富有成效的专业化和规模化生产。

(3) 重视基础研究,提高整体水平。结合我国国情,根据设备研制和实际生产的具体需求,有针对性的开展应用基础研究和应用技术研究,研究成果对提高设备和应用工艺水平应具有实际意义,易于为产业部门接受并与生产应用结合起来,转化为生产力,产生经济效益。

(4) 充分利用国外技术成果,走技术引进与自主创新相结合的新路。我国的电子束焊接技

术,经过几十年的发展已有相当的水平,如能结合设备引进,由设备研发单位和用户共同组成引进、消化吸收和创新小组,既有利于用户充分发挥设备作用,又有利于研发单位吸收国外先进技术,走出由引进技术到自主创新的新路。实现这一方案需要主管部门和行业协会制定相应的政策,关键是如何确保双方受益,实现双赢。

参考文献

- 1 A. H. Meleka Electron-Beam Welding: Principles and Practice. Published for the Welding Institute by McGRAW-HILL, London, 1971
- 2 8th International Aachen/Beijing Welding Conference Joining Together '02 Beijing, 23rd May, 2002
- 3 王亚军. 电子束加工技术的国内外现状与发展. 中国机械工程学会第八次全国焊接会议论文集, 1-184-189. 北京: 机械工业出版社
- 4 刘春飞, 贺宗德. 西德和法国的焊接技术. 出国考察报告(10), 1985, 航天部七〇七研究所
- 5 刘金合. 高能束流焊接技术的最新进展. 中国机械工程学会焊接学会, 第十次全国焊接会议论文集. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社
- 6 周广德. 电子束焊接技术国内外发展概况. 第三届电子束、离子束学术年会论文集
- 7 张朝汉. 国外工业用高功率电子束近年来的进展. 第三届电子束、离子束学术年会论文集
- 8 林世昌, 邱宁茂. 电子束焊接技术的某些应用前景及与激光焊接的综合比较. 1999, 全国荷电粒子源粒子束学术会议论文集, P132-137, 1999
- 9 刘方军. 电子束焊. 焊接手册(I) P416-439, 中国机械工程学会编, 北京: 机械工业出版社, 2001
- 10 关桥. 我国现代运载工具制造工程中的特种焊接技术. 中国焊接学会40周年, 中国焊接学会15周年纪念文集, P45-50, 2002
- 11 何一星. 最近电子束焊接重新在欧洲兴起. (译自) 溶接技术, 2000.4
- 12 高能束流加工技术重点实验室论文选编. 北京航空工艺研究所, 1995
- 13 HDZ-6型电子束焊机研制报告. 机械部桂林电器科学研究所
- 14 北京中科电气高技术公司样本资料
- 15 桂林狮达机电技术工程有限公司样本资料
- 16 PTR公司(含L-H公司)样本资料
- 17 IGM公司(含MESSER GRIESHEIM公司)样本资料
- 18 CVE公司(含TORVAC WENTGETE公司)样本资料
- 19 SCLAKY公司(含FERRANTI SCLAKY INC)样本资料
- 20 E. O. ПАТОНА ЭЛЕКТР样本资料
- 21 TECHMETA公司样本资料