

# 电子束焊接技术的发展及其在成飞公司的应用

Development of Electron Beam Welding and Application on AVIC CAC

成都飞机工业(集团)有限责任公司 李 飞 虞文军 鲍 晶



李 飞

硕士,毕业于华中科技大学,研究生期间参与了学校和北京航空制造工程研究所合作的电子束焊接国防 973 课题。现在成都飞机工业(集团)有限责任公司从事电子束焊接工作,参与了成飞公司引进北京航空制造工程研究所研制的电子束设备安装及电子束焊接技术研究工作。

电子束焊接是一种先进、成熟的焊接技术,在国外航空、航天、核能、动力、机械、汽车等众多制造技术领域发挥了重要作用,取得了巨大的经济效益。

目前,成飞公司焊接多采用手工

电子束的能量密度居目前已实际应用的各种焊接热源的首位,具有优质、高效、低耗、清洁和灵活生产等优越的技术特性,日益受到制造业的重视,并具有很多传统焊接工艺所无法比拟的技术优势。

焊接或半自动化焊接技术,全自动化和数控焊接设备较少。为了提高焊接水平,公司引进了由北京航空制造工程研究所研制的真空电子束焊机。电子束焊接的引入提高了公司焊接的科研和生产实力。

## 电子束焊接技术历史及发展

电子束焊接技术起源于德国。1948年,德国物理学家 Steigarwald 博士在研究高功率密度束流源在电子显微镜上的应用时,发现电子束可用于热加工,尤其适用于机械表上宝石的打孔,以及真空条件下金属的熔化和焊接<sup>[1]</sup>。

电子束焊接技术的诞生和最初应用都是和当时核能工业技术的需求紧密联系着的。1954年法国的 J.A.Stohr 博士用自行研制的一台电子束焊接装置,为法国原子能委员会成功焊接了核反应堆的燃料包壳。

这标志着用电子束焊接金属获得了成功,使得电子束焊接技术受到世界的普遍关注,尤其受到英国、美国、德国、法国和前苏联等先进工业国家的高度重视,争相开发。在 20 世纪 60 年代初期,我国紧随世界电子束加工技术的发展,开始设备及工艺的研究工作<sup>[2]</sup>。

20 世纪 70 年代,随着电子束焊接技术日益成熟,电子束焊接设备的稳定性和操作过程自动化程度的提高,以及当时机械制造领域技术改造的需要,使电子束焊接技术不仅牢固立足于尖端工业中,而且以其精密化焊接的特点迅速普及到一般机械制造业。从 20 世纪 80 年代末开始,电子束焊接又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。同时,在研发超大型真空室、开发高功率电子枪和电源、实现大厚度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发挥重要作用<sup>[3]</sup>。

## 电子束焊接技术的原理和优点

### 1 电子束焊接技术原理

电子束焊接是利用会聚的高速电子轰击工件接缝处所产生的热能,使材料熔合的一种焊接方法,电子轰击工件时,动能转变为热能,从而可作为焊接的热源。电子束是在高真空环境中由电子枪产生的,电子枪一般是由阴极、聚束极和阳极组成。当阴极被加热后,由于热发射效应,表面会发射电子且在电场作用下(热发射材料接负高压)连续不断地加速飞向工件。通过电磁光学系统把电子束会聚起来,提高其能量密度,以达到熔化焊接金属的目的。

### 2 电子束焊接的优点

电子束的能量密度居目前已实际应用的各种焊接热源的首位,具有优质、高效、低耗、清洁和灵活生产等优越的技术特性,日益受到制造业的重视,并具有很多传统焊接工艺所无法比拟的技术优势。

(1) 深宽比大。高功率密度的电子束能够形成一个深而窄的焊缝。通常电弧焊焊缝的深宽比很难超过 2:1,而电子束焊缝的深宽比可达 20:1,脉冲电子束焊接可达 50:1<sup>[4]</sup>。

(2) 焊接效率高。由于能量集中,熔化和凝固过程均大大加快,因而焊接速度加快。采用氩弧焊焊接 UKAEA 的 60mm 厚 316LN 不锈钢全尺寸模型的大型受控热核反应堆装置曲面场线圈框架时,共需 71 天完成;而英国焊接研究所(TWI)采用电子束焊接仅需 24h<sup>[5]</sup>。在焊接大厚度件时,电子束的深穿透能力在提高

焊接效率上发挥了无可替代的作用,如采用埋弧焊焊接厚度 100mm 材料时,需焊接 90 道,而电子束焊接只需焊接 1 道,即能满足工艺要求。

(3) 工件变形小。由于能量集中,焊接速度快,输入到工件的热量小,深宽比 H/B 大,焊接热影响区小,因而产生的工件变形较小。图 1 是英国焊接研究所(TWI)采用电子束焊接的双金属锯条,由于焊接速度快,工件几乎没有变形<sup>[6]</sup>。



图1 电子束焊接的双金属锯条<sup>[6]</sup>

(4) 焊缝物理性能好。电子束焊接速度快,能够避免晶粒长大,使延展性增加。同时,由于热输入小,高温作用时间短,碳和其他合金元素析出少,焊缝抗蚀性好。真空对焊缝有良好的保护作用,而且通常采用不填料焊接,避免了环境和不纯物质对焊缝金属的污染。

(5) 可焊材料多。电子束可对陶瓷、石英玻璃等进行焊接;可以焊接某些功能材料、超导材料、热敏材料;同时适用于焊接难熔金属、活泼金属和高纯度金属,以及通常熔化焊方法无法焊接的异种金属材料;还可以将陶瓷与某些金属焊接在一起。

(6) 焊接工艺参数易于调节,工艺适应性强,重复性和再现性好。

## 电子束焊接的应用

近 30 年来,我国电子束焊接技术发展较快,焊接产品已由原子能、火箭、航空等国防部门向民用部门发展。例如汽车齿轮组合体、后桥、传动箱体的焊接等,并已取得了明显的

技术经济效益。此外电站锅炉、汽轮机、发动机、化工容器等的焊接也都采用了电子束焊接方法。另外,其他电子束加工技术在近些年来也有很大发展。在我国,电子束气相沉积和电子束钎焊技术已经比较成熟,尤以北京航空制造工程研究所为代表成果丰硕。电子束钻孔技术也有很多应用,如南方航空动力机械公司的航空发动机燃料室罩加工就是应用此技术。电子束快速成型和电子束毛化技术也开始起步。

### 1 成飞公司目前主要的焊接技术

成飞公司是我国航空武器装备研制生产和出口的主要基地,是民机零部件重要制造商。一批具有世界先进水平的新技术、新设备、新工艺、新材料被广泛应用于产品的设计制造过程中。

目前公司焊接技术主要应用在金属材料,常用的有电弧焊、氩弧焊、CO<sub>2</sub> 保护焊、氧气-乙炔焊、激光焊接、电渣压力焊等多种,主要以手工焊和半自动焊设备为主,大型的自动化焊接设备较少。先进的焊接技术和焊接设备在逐步配备。

### 2 电子束焊接设备在成飞公司的应用

(1) 全自动氩弧焊技术和电子束焊接技术对比。

在公司还没引进电子束焊机之前,某机型转轴类零件,材料为高强度钢,设计要求使用全自动氩弧焊焊接。零件为厚壁轴类结构,焊接厚度 12mm。氩弧焊一次最大的焊接深度为 4mm。为了焊透零件,采取开坡口多层多道焊接的方式进行焊接。整个工艺流程如下:第一步,定位焊:使用手工氩弧焊将零件定位;第二步,打底焊:用自动氩弧焊机在坡口底部焊接一周,保证焊缝根部焊透无缺陷,焊完送 X 光检测;第三步,打底焊 X 光检测合格后,进行多道多层焊接,每次堆焊 1~1.5mm,只到将坡口填满。每堆焊 3~4 次 X 光检测一次,如果有缺陷,打磨缺陷部

位用手工氩弧焊补焊后再堆焊。第四步,整个零件焊接完成后送X光。

使用全自动氩弧焊焊接此轴类零件共需堆焊10次,每层堆焊完成后需冷却到室温才可以继续堆焊,非常耗时,而且零件的焊接质量不稳定,经常出现气孔,需经打磨补焊才能继续焊接。整个过程进行了4次X光检测。生产一件零件需2名操作人员耗时20h左右。

成飞引进的电子束焊机型号为ZD150-30C CV65M,由北京航空制造工程研究所研制,其主要部件电子枪是德国Steigerwald Strahltechnik公司合作生产的高压型电子束焊机,控制系统为西门子的SIMATIC S7-400容错PLC,见图2。

设备加速电压可调节范围为70~150kV,电子束流可调节范围为0~200mA,焊接速度可调节范围为0~50mm/s;真空室尺寸8200mm×4000mm×2000mm,容积65.6m<sup>3</sup>,电子束功率30kW。

焊接工件的最大尺寸为4000mm×2000mm×1000mm,主要用于高强结构钢、不锈钢、铝合金、钛合金、铜合金等材料的焊接。钢、钛合金焊接厚度≥110mm,铝合金≥150mm。

公司引进电子束焊接设备后,某

机型上类似的轴类零件使用电子束焊接,相同的结构和厚度的轴类零件,在焊接工艺参数确定后,电子束焊接可以一次成型零件,整个焊接过程仅焊后进行一次X光检测,焊接参数重复性好,焊接质量稳定,该项零件进入电子束焊接批生产期后,焊接的零件均合格。对比全自动氩弧焊,2名操作者只需1h即可生产一件合格的零件,极大地提高了生产效率和焊接质量。

电子束焊接特别适用于大厚度和批生产零件上,目前车间正计划采用电子束焊接来代替全自动氩弧焊,相关的试验和工艺正在摸索中。

(2)电子束焊接技术应用的局限性。

电子束焊机引进后,车间对现有的零件进行清理调查,希望将大厚度焊接、焊缝要求高及贵重零件采用电子束焊接。

某机型管状零件采用手工氩弧焊,材料为TC4,焊缝要求为一级。焊缝截面为不规则的水滴形,最大焊接厚度为14mm,最小焊接厚度为6mm,对手工氩弧焊操作者要求极高,目前整个车间仅有一名高级焊接技师能对此零件进行焊接。

针对此项零件,车间组织人员进行技改。采用电子束焊接技术碰到

以下难点:焊缝截面为不规则的水滴形,如果采用电子束焊接,需对电子束焊接的聚焦电流进行编程变化控制,实现非常困难;焊缝厚度不一致,难以精确控制电子束流的变化来满足变熔深的要求;电

子束焊接一次成型,焊缝根部无法清理,出现背面成型不好的情况无法挽救。最后决定此项零件焊接结构没改变之前仍采用手工氩弧焊。

飞机上形状不规则和厚度不一致的零件较多,目前情况下,只能采用手工焊接。但手工焊接过于依赖焊工的技术水平,焊接质量不稳定,产品质量难以保证。电子束焊接在柔性焊接方面的性能较差,对此类零件也无法进行焊接,柔性化有待提高。

## 电子束焊接技术在成飞公司应用的展望

随着电子束焊接技术在各工业领域的渗透,特别在精密加工、原子能及航空航天领域具有的应用前景,使得各国的研究者竞相展开了对电子束基础理论及应用技术的研究。美国、俄罗斯各研究人员利用电子束对碳钢、合金钢、不锈钢、金、铝合金及高强钢等材料进行了焊接工艺试验,对于电子束焊接工艺参数(加速电压、焊接电流、速度、聚焦电流、焦点位置等)对接头组织及性能影响进行了研究,为合理地优化焊接工艺、保证接头的质量提供了理论依据<sup>[7]</sup>。

电子束焊接技术的引进填补了成飞公司高能束焊接的空白,极大提高了公司的焊接能力。目前主要工作集中在实际零件生产中的应用,科研能力和理论研究有待提高。需要在焊接可靠性、稳定性及质量在线检测技术的发展,新产品设计与电子束技术的有机结合,焊缝自动对中与跟踪的自适应控制技术的发展,深穿透机理及电子束与材料交互作用等物理现象的进一步探求等方面进行攻关。

本文共有参考文献7篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 侧卫)



图2 成飞公司引进的电子束焊机ZD150-30C CV65M