

# 电子束焊接在航空航天工业中的应用

Application of Electron Beam Welding Technology in Aerospace Industry

哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室 陈国庆 张秉刚 冯吉才  
哈尔滨工业大学力学博士后科研流动站 孙毅

航空航天工业的发展无疑是新技术、新工艺和新材料研究与应用水平的综合体现,焊接技术作为一种重要的加工方法在飞机发动机及运载火箭制造中始终处于至关重要的地位。焊接技术的进步与发展不仅能给航空航天结构减重,而且还能为其性能的提高提供技术支持。

航空航天工业的发展无疑是新技术、新工艺和新材料研究与应用水平的综合体现,焊接技术作为一种重要的加工方法在飞机发动机及运载火箭制造中始终处于至关重要的地位。焊接技术的进步与发展不仅能给航空航天结构减重,而且还能为其性能的提高提供技术支持。

电子束焊接具有能量密度极高( $10^6 \sim 10^9 \text{W/cm}^2$ )、容易实现金属材料的深熔透焊接、深宽比大(可达70:1)、焊缝热影响区小、焊接残余变形小、焊接工艺参数容易精确控制、在真空环境下焊缝纯净、重复性和稳定性好等特点,这些优势是其他熔焊方法难以比拟的,因而电子束焊接在航空航天这些高技术制造领域正日益得到广泛的应用。

本文在介绍电子束焊接技术研究发展的基础上,概括总结了电子束焊接技术在航空航天领域中的应用

现状,并对其今后的发展作了展望。

## 电子束焊接技术的研究发展现状

电子束焊接(EBW)是利用电子枪中阴极所产生的电子在阴阳极间的高压(25~300kV)加速电场作用下被拉出,并加速到很高的速度(0.3~0.7倍光速),经一级或二级磁透镜聚焦后,形成密集的高速电子流,当其撞击在工件接缝处时,其动能转换为热能,使材料迅速熔化而达到焊接的目的。

当前,国内外在电子束焊接技术领域取得了较快发展,获得了很多优异成果<sup>[1-4]</sup>。

### 1 国外电子束焊接技术的研究发展现状

经过几十年的发展,目前全世界已有几千台电子束焊接设备在核工业、航空宇航工业、精密加工业及重

型机械等工业部门应用,全球电子束焊接技术较先进的国家是德国、日本、美国、独联体各国及法国等。

在电子束焊接设备的研制开发方面具有实力的国家及公司有德国的PTR精密技术有限公司、英国的剑桥真空工程有限公司以及英国焊接研究所(TWI)、法国的TECHMETA公司以及乌克兰的巴顿电焊研究所等。

上述几家公司及研究所的电子束焊接设备在国际上都有较高的知名度,所研发的电子束焊机各有其适用性及特点。其中乌克兰巴顿研究所生产的中高压电子束焊机技术成熟、性能稳定,在前苏联的航空宇航焊接试验中得到了成功的实践应用;而法国TECHMETA生产的焊机在低中压方面有着优异的综合性能。

随着电子束焊接技术在各个工业领域的渗透应用,特别是在精密

加工、原子能及航空航天领域的良好应用前景,使得各国的研究者竞相展开了对电子束焊接基础理论及应用技术的研究。国外已定型生产 60~300kV 的电子枪,特种材料、异种材料、空间复杂焊缝、变截面焊缝的电子束焊接已用于生产,已开始焊缝自动跟踪、焊缝加丝等研究。电子束打孔已成为生产线成熟工艺,打孔速度可达每秒加工几十个到几万个小孔,最小孔径可达 0.001mm,深径比可达 30。电子束焊已用于运载火箭、航天飞机等主承力构件等大型结构的组合焊接,飞机梁、框、起落架部件和发动机整体转子、机匣、功率轴等重要结构的焊接,以及核动力装置压力容器的制造。美国、独联体各国的研究人员利用电子束对碳钢、合金钢、不锈钢、钛合金、铝合金及高强度等材料进行了焊接工艺试验,对电子束焊接工艺参数(加速电压、焊接电流、焊接速度、聚焦电流等)对接头组织及性能的影响进行了研究,并对气孔、裂纹及钉扎等缺陷的产生机理进行了探讨,提出了相应的工艺解决措施;对电子束焊接温度场、应力应变及其引起的裂纹生成扩展行为进行了数值描述研究<sup>[5-6]</sup>。德国阿亨大学 ISF 焊接研究所对电子束束流特性及其对焊缝成形的影响进行了研究,首次较全面地讨论了电子束束流特性对焊缝成形的影响,为合理优化焊接工艺、保证焊接接头的质量提供了理论依据。日本神户船舶大学采用有限元分析的方法对电子束焊接的非均质弹塑性断裂试件的裂纹近尖端变形进行了研究,讨论了电子束焊缝中应力应变对断裂行为的影响规律。在电子束焊缝微观结晶机理方面,加拿大的科技人员研究了硼的晶界偏析对 718 合金电子束焊接热影响区的微观裂纹行为的影响。

## 2 国内电子束焊接技术的研究发展现状

我国是 20 世纪 60 年代初开始

跟踪世界电子束焊接技术的发展,并开始了电子束焊接设备及工艺的研究工作。中航工业北京航空制造工程研究所、广西桂林电器科学研究所及中科院沈阳金属研究所均是最早开展此项工作的几家单位之一。这三所均分别自行研制出了中高压的真空电子束焊接设备,并用其成功进行了一系列的电子束焊接理论探讨及工艺试验,为我国电子束焊接技术的起步及发展作出了贡献。随着我国对外开放的不断深入,进入 20 世纪 80 年代以后,我国多家科研单位及大型工业企业对外引进了国外的先进电子束焊接设备,从而使我国的电子束焊接技术在研究与应用上逐步发展壮大,至今已研制生产出不同类型和功能的电子束焊机上百台。近 20 年来,出现了关键部件(电子枪、高压电源等)引进、其他部件国内配套的引进方式,我国研制成功了国内第一台生产中使用的 GDH-15 型高压电子束焊机:加速电压为 150kV,功率为 15kW。近 20 年来,有关电子束焊接的文献大多集中在焊接工艺参数的优化、焊接冶金和穿透机理的研究、焊接技术的应用及焊接接头基本力学行为等方面。我国重型汽车集团在“七五”期间,采用电子束焊接方法成功实现了奥地利引进项目的板材冲压货车桥壳的生产。在中国南方航空动力机械公司,许多航空发动机关键零部件和民品生产都使用了电子束焊接技术。北京航空制造工程研究所在 30 多年的时间里,进行了一系列的电子束焊接工艺研究,对诸如铝合金、钛合金、不锈钢、超强钢及高温合金等均进行了较为系统的研究,例如在某型新研制的航空发动机上,电子束焊接工作量占 25%~30%,可以说整个发动机就是用电子束焊接连接起来的。电子束焊接技术在我国齿轮加工业中也得到了广泛的应用,电子束焊接分体齿轮制造技术的应用提高了齿轮

综合力学性能,极大地降低了成本,提高了生产率。

## 电子束焊接技术在航空工业的应用

当前航空航天对电子束焊接技术研究的需求主要体现在新材料焊接与特种焊接研制、焊接热过程和应力应变计算机模拟与仿真以及大厚度钛合金焊接工艺技术等方面,进一步扩大电子束焊接技术在航空航天领域的应用,解决高强钛合金、超高强度钢以及大厚度材料框和盒形梁等结构的焊接工艺已成为电子束在我国航空航天工业应用中的工作重点<sup>[7-8]</sup>。

俄罗斯和西方发达国家电子束焊接技术发展迅速,已在许多飞机机型上得到了较普遍的应用,电子束焊接技术已成为先进飞机研制不可缺少的支撑技术。

国外最早先将电子束焊接技术广泛应用于飞机发动机核心机部件的制造,如美洲虎攻击机的阿杜尔涡扇发动机钛合金压气机转子采用了 7 条环形电子束焊缝;米格-29 的 PД-33 涡扇发动机高压压气机转子前 3 级盘及第 4~6 级盘鼓,苏-27 的 АП-31Ф 涡扇发动机高压压气机的第 1~3 级盘及 4~6 级盘,均采用了电子束焊接技术;德国 EADS Space Transportation 公司已将电子束焊接应用于火箭发动机燃烧室的生产。最典型的代表是美国大型客机发动机——CMF56 涡扇发动机,其核心机部件的低压压气机转子、高压压气机转子、燃烧室等部件均采用真空电子束焊接,使发动机的重量、结构设计、结构的制造精度和使用寿命均得到了改善,使发动机的制造水平得到了极大的飞跃,可以说现代先进的发动机是采用电子束等焊接技术连接而成的,由此可以看出电子束焊接技术对飞机发动机的研制起着至关重要的作用。

国外在飞机制造技术方面,电子束焊接技术是飞机重要承力构件,如钛合金承力框、梁等的关键制造技术之一。电子束焊在国外飞机重要承力构件上的应用如表 1 所示<sup>[9]</sup>。俄罗斯拥有世界最先进的焊接技术,系统的焊接结构研究成果,与结构设计、选材和焊接技术的研发(基础研究)紧密结合,在飞机制造中大量采用焊接技术。

仅承担输送液体的管筒件 3 方面次要构件的领域,不断地被制成承担一定载荷的构件,如飞机翼盒的承力支撑架、机身副支撑梁和发动机机架等。这些结构已在被美国号称为“全钛飞机”的舰载机 F-16、F-19 和前苏联的 SU-27 中得到实际应用,目前在 SU-34、FY-22 和 FY-24 中大量使用;不仅在战斗机,而且在民用飞机上,如波音的起落架和空客

一次完成焊接,生产效率高,焊接质量好。在压气机部件的制造过程中,电子束焊接应用更加广泛。压气机转子一般选材为 GH4169 材料和钛合金材料,其主要特点是转速高,每分钟可达数千或数万转,鼓盘式转子兼有鼓式转子的抗弯刚性和盘式转子的承受大离心载荷的能力,因而被广泛采用,尤其是在现代涡扇发动机的高压压气机上。为了不影响转子的定心和平衡,减轻转子的重量,采用电子束焊接发动机中的转子。在发动机燃烧室的加工制造过程中,电子束焊接得到了更多的应用。燃烧室部件是发动机中承受热负荷最大的部件,重量要轻。燃烧室部件易出现故障,危及自身及其他部件。因此对燃烧室部件的制造质量要求较高。在燃烧室机匣的制造中,采用电子束焊接工艺将安装边与钣金件焊接起来,大大节约了材料。现代发动机多采用环形燃烧室结构,其燃烧室内外机匣均采用电子束焊接结构,一般为 GH4169 材料,多为薄壁件,焊接时保证焊缝质量满足验收标准的 I 级要求<sup>[12]</sup>。

表 1 电子束焊在飞机重要承力构件上的应用

国别及公司	机种型号	电子束焊焊接的重要受力构件
格鲁门公司(美)	F-14 钛合金	中央翼盒
帕那维亚公司(英、德、意合作)	狂风	钛合金中央翼盒
波音公司(美)	波音 727	300M 钢起落架
格鲁门公司(美)	X-29	钛合金机翼大梁
洛克希德公司(美)	C-5	钛合金机翼大梁
达索·布雷盖公司(法)	幻影-2000	钛合金机翼壁板、大型钛合金长桁蒙皮壁板
伊留申设计局(前苏联)	ИЛ-86	高强度钢起落架构件
英、法合作	协和	推力杆
英、法合作	美洲虎	尾翼平尾转轴
通用动力公司、格鲁门公司(美)	F-111	机翼支撑结构梁
前苏联	Su-27	高强度钢起落架构件
洛克希德公司(美)	F-22	钛合金前梁
洛克希德公司(美)	F-22	钛合金后机身梁

西方国家为了满足研制高水平、高性能飞机的需求,制造商越来越多地采用焊接结构,其中电子束焊接作为一种先进焊接技术,已广泛应用于飞机主要承力构件的制造。其中,以格鲁门公司为代表,他们认为机械加工后进行电子束焊接是制造起落架、飞机大梁和结构骨架的一种正确方法。美国 F-22 战斗机、欧洲 2000 型战斗机机体的部分承力结构、欧洲四国合作研制的 EJ200 发动机第三级风扇钛合金整体叶盘等均采用了电子束焊。

与此同时,应用材料也发生了极大的变化,特别是钛合金零件已经走出了小型薄壁件、整体成形钣金和

A380 的发动机机架上都有使用的先例。由于钛合金的材料特性,这些结构必须在保护气氛或真空室内焊接,这正是电子束焊接技术应用的重要领域<sup>[10-11]</sup>。

在航空制造业中,电子束焊接的应用得到了长足的发展,在航空发动机低压风扇机匣的制造过程中,为了减轻发动机的重量,新型发动机风扇机匣采用钛合金制造,采用机匣外环与静子叶片电子束焊接的工艺,简化了制造工艺,同时在钛合金的焊接过程中,电子束焊接在真空中进行,完全避免了钛合金在大气中焊接存在的氧化问题,电子束焊接热输入量小,零件变形小,可以实现数控编程

### 电子束焊接技术在航天工业的应用

宇航技术中所用的各类火箭、卫星、飞船以及空间站等的构件、发动机,以及所用的各种仪器都有一些共同特点:不仅要求零部件质量极其可靠,能经受各种恶劣环境,而且要求零件尺寸小,重量轻,密封性好。这对航天器的结构设计、材料选择及加工工艺都提出了极为苛刻的要求,实践证明电子束焊接作为一种有效的熔焊方法,是解决这些技术难题的有效工艺手段之一。

舱外航天服是航天员执行出舱活动的基本保障系统,而躯干壳体是航天服的重要骨架。作为承力结构主体,躯干壳体对其外形结构尺寸有严格的要求,若采用常规熔化焊接方

法,由于焊接变形等因素,易造成尺寸超差。根据躯干结构特点,采用电子束焊接连接门边框与躯干薄壁壳体,可以充分发挥高能束焊接质量高、变形小的优点。

发动机燃烧室身部采用铜胎上电铸金属与不锈钢焊接结构,焊接难点在于2种焊接金属的物理化学性能差别很大,接头易产生有害杂质偏析,导致在较大的焊接应力下开裂。电铸层如果受高热还会发生电铸层结合削弱、剥离的情况。此外,电铸金属层所带磁性对电子束有很大影响,电子束焊接前零件需整体退磁,电子束路径还需采用磁场屏蔽等手段。

电子束焊接燃烧室身部时使用高压型电子束焊机,采用硬规范焊接,高焊速,尽量减少焊接热量和控制变形,降低接头应力,防止易熔夹层的形成。严格控制焊接热输入量,以防止电铸金属层与铜胎之间的电铸结合力因过热而降低,并导致开裂<sup>[13]</sup>。

波纹管组合件是航天发动机产品中利用电子束焊接的一个主要部分。航天发动机活门一般采用多层金属波纹管作动密封元件,执行指令时,波纹管组合件的动作用部分要工作灵活、无卡滞。尤其在液氢温度下可以显示无可比拟的优点。因此,制造过程中必须保证波纹管组件焊缝气密无泄漏和运动付活动灵活,这就要求波纹管组件要有合理的结构和可靠的生产工艺,其中,制造的关键是波纹管的焊接<sup>[13]</sup>。真空电子束焊接波纹管的接头强度高,可将焊接的变形量减至最小;精密配合的零件不会出现卡滞、抱死情况;焊缝致密、美观,可靠性高。

航天工业中,压力容器的主要功能是为卫星或者飞船贮存并提供各种流体介质,其中燃料贮箱和气瓶是星船推进系统最重要的部件,其作用是给星船各种发动机提供燃料、高压气体等工作介质。推进系统部分或

整体失效将意味着卫星无法定点在指定轨道或无法进行轨道保持,最终导致卫星使用寿命降低甚至整星报废。因此,研制高可靠的星船压力容器始终是卫星等空间系统应用中最重要保障技术条件之一,而电子束焊接在星船压力容器的制造中占据着主导地位。

高压气瓶(含肼瓶)是星船中配合贮箱共同完成推进系统工作的重要部件<sup>[14]</sup>,一般需要承载几百个大气压的工作压力。从统计的故障及失效实例表明,气瓶的焊缝是主要薄弱环节,因此针对星船气瓶焊接质量的要求历来非常苛刻。由于产品需承受较高的压力并且瓶体内部洁净度要求很严格,气瓶的主要焊接接头(中间赤道缝和两级圈盖板端面缝)只能采用对接结构形式,焊接工艺必须采用单面焊双面成形的电子束穿透焊,且穿透焊接过程中不允许有内部飞溅多余物,此外焊缝内外表面的咬边缺陷在这类容器焊接中也比较常见,需要从设备及工艺等方面加强控制。

近年来,由于新材料技术的发展,为了降低卫星质量,增加有效载荷,以碳纤维为主的复合材料高压气瓶开始得到应用。复合材料气瓶由内层的金属内衬层和外层的复合材料层组成。利用金属材料气密性好的特点,金属内衬层起气密作用;复合材料层利用质量轻和可设计性强的特点承担大部分的内压载荷。复合气瓶特有的双层结构赋予其良好的结构性能和只漏不爆的安全失效模式,将是未来星船高压气瓶发展的新方向。这类气瓶的焊接对象主要是针对金属内衬,气瓶内衬通常采用铝合金或者钛合金制造,厚度较薄,真空电子束的精确可控性是其应用于气瓶内衬焊接的有效方法,尤其是在解决铝合金内衬焊接中极易产生的气孔危害方面,电子束焊接的真空环境条件可以很好地避免气孔缺陷<sup>[14]</sup>。

## 结束语

电子束焊接在我国的发展已有40多年的历史,它作为一种先进焊接技术在设备及工艺等技术方面都取得了可喜成绩,积累了丰富的实践经验,锻炼和造就了一大批从事电子束焊接的技术人才,为我国的航空航天事业做出了不可磨灭的贡献。就几十年的发展,我国的电子束焊接技术重点侧重在焊接理论和工艺实践上,如同种材料、异种材料、难熔金属和大厚度材料的焊接,而对于电子束焊接过程中电子束与金属间的深穿快速物理化学冶金作用,以及焊接机理的本质研究有所欠缺。

我国是电子束焊接技术的使用大国,但是航空航天工业领域的电子束焊接设备主要依靠进口。有一些单位正在自主研发电子束焊接设备,但是国内焊机性能与国际先进水平相比还有一段差距,且关键技术(如电子束焊枪,阴极)仍然受制于人,这将会影响我国航空航天事业的稳步快速发展。

鉴于以上现状,今后的工作重点将转移到异种材料之间连接、航空航天用的高温结构材料及先进的新型结构材料与黑色金属、有色金属的异种材料的电子束焊接,电子束焊接的理论研究及分析测试手段还要更加深入。

在电子束焊接设备上在加强对引进设备及技术的消化吸收和掌握的同时,还要加强自主研发,大胆创新、尝试,充分利用国际先进技术成果,在设备的关键技术(电子枪)上加大研究投入,以期最终实现电子束焊接设备的全面国产化,保障我国电子束焊接技术与我国的航空航天事业携手并肩,再上一个新的台阶。

本文共有参考文献14篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 良辰)