

航空器制造中的焊接技术

Welding Technology of Aircraft Manufacturing

南京航空航天大学 薛松柏 张亮 皋利利 韩宗杰 禹胜林 朱宏



薛松柏

南京航空航天大学材料科学与技术学院教授, 博士生导师, 享受国务院政府特殊津贴专家, 江苏省“材料加工工程”十一五重点学科首席学科带头人。现担任南京市机械工程学会焊接专业委员会副主任, 江苏省焊接学会常务理事。长期从事焊接材料、焊接工艺研究及钎焊材料、钎焊工艺研究。

在航空工业中, 无论是飞机、发动机或机载设备的制造都广泛采用了各种焊接技术。近几十年来, 飞机、发动机、机载设备的飞速发展推动了焊接技术的发展, 不同学科工程技术的借鉴以及焊接技术本身发展的推动, 也促使新的焊接技术以及包括焊接技术在内的组合工艺的发展, 从而使许多新材料、新结构在航空工业中得到

近几十年来, 飞机、发动机、机载设备的飞速发展推动了焊接技术的发展, 不同学科工程技术的借鉴以及焊接技术本身发展的推动, 也促使新的焊接技术以及包括焊接技术在内的组合工艺的发展, 从而使许多新材料、新结构在航空工业中得到应用。焊接已成为航空制造工程中最重要连接方法之一。

应用。焊接已成为航空制造工程中最重要连接方法之一^[1-2]。

航空器焊接技术

1 机身构件

机身构件典型的焊接结构主要有起落架、航空压力容器和油箱等。

(1) 电子束焊。在航空领域, 电子束焊接技术首先应用于战斗机的制造中, 例如发动机压气机转子、燃烧室等核心机部件的焊接, 飞机起落架、钛合金承力框、钛合金壁板、机身承力梁等以及机载精密零部件的焊接。采用该技术制造飞机零部件, 突出的特点是减重、精度高、强度好、构件的整体化制造水平高^[3]。

20 世纪 80 年代初, 为了满足研制高水平、高性能飞机的需求, 西方国家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的

焊接技术, 已广泛应用于飞机主要承力构件的制造。电子束焊接装置最早可以追溯到 1958 年, 前苏联乌克兰科学院研究出了前苏联的第一台设备, 由于该类型设备比较昂贵, 因此只能在原子能、航空航天的一些特殊部门使用。现在, 电子束焊接已经成为大型飞机制造公司的标准配置, 是制造飞机主、次承力结构件和机翼骨架的必选技术之一, 也是衡量飞机制造水平的一把标尺。电子束焊接技术可以获得高质量、大深宽比的焊缝, 在航空航天工业中发挥着不可替代的作用。电子束焊接是一种高能量的焊接方法, 产生的热影响区较小, 以及工件变形小, 然而这种焊接的操作必须在真空环境中进行, 电子束焊特别适用于钛合金材料的焊接^[4]。F15 战斗机的机翼焊接就是采用电子束焊完成的^[5]。在一些军用飞机

机身钛合金焊接中电子束焊也多有应用^[6]。F22后机身钛合金铸件“焊接难”问题曾困扰工程师至少5个月,最终通过电子束焊实现了铸件的连接^[4,7]。

(2) 激光焊。关于激光焊接应用的报道最早可追溯到1962年。激光焊接具有能量密度高、精度高、热影响区小、变形小、空间位置转换灵活、可在大气环境下焊接等优点。该技术的应用随着激光焊接技术的发展而日趋广泛,目前已经涉及航空、航天、兵工、汽车等多个领域。在航空航天方面,主要用于飞机大蒙皮的拼接以及蒙皮与长桁的焊接,以保证气动面的外形公差。另外在机身附件(如腹鳍和襟翼的翼盒)的装配中也大量使用了激光焊接技术。近年来,激光焊接也多用于薄壁零件(如进气道、输油管道、变截面导管和异型封闭件等)的制造中。

20世纪70年代初,美国就已经利用15kW的CO₂激光器针对飞机制造业中的各种材料、零部件进行焊接试验、评估及工艺的标准化。在欧盟各国家中,意大利首先于20世纪70年代末,从美国引进了15kW的CO₂激光器。随后从20世纪80年代中后期开始,欧盟对航空发动机、航天工业中的各种容器及轻量化结构立项,开展了长达8年的激光焊接应用研究,材料涉及钛合金,镍基、铁基高温合金。美国国家航空航天管理局曾在1991年资助研究人员模拟KC-135的空间环境,采用Nd-YAG激光器焊接304不锈钢^[8];用6kW的CO₂激光器,焊接喷气发动机燃烧室套衬,该零件需在1.2mm的镍基合金轮边与冷弯零件上得到1.8mm深的焊缝,如此严格的焊缝深度要求只有激光焊接才能实现。

近年来激光焊接技术逐渐取代传统的铆钉进行铝合金飞机机身的制造,从而使飞机机身重量减轻近20%,强度提高近20%。德国宇航

公司MBB将激光焊接用于飞机机身、机翼与内隔板和加强筋的全部连接,取代了原有的铆接工艺,被德国宇航界称为航空制造业中的一大技术革命。空客公司经过8年努力,成功地采用激光焊接代替铆接,实现了A340飞机的全部铝合金内隔板的激光加工,使机身重量减轻18%,制造成本降低近25%,随后其又将激光焊接加工技术推广应用到A318、A380飞机^[9]。目前,高强铝合金激光焊接成果已经成功应用于欧洲空客公司的飞机制造中,其铝合金内隔板均采用激光加工技术,激光焊接技术取代传统的铆接工艺,被认为是飞机制造业的一次技术大革命^[10]。

(3) 搅拌摩擦焊。1991年英国焊接研究所发明的搅拌摩擦焊,是一种固态连接工艺。该工艺弥补了2和7系列铝合金在航空结构中无法焊接的缺陷。搅拌摩擦焊接区具有热影响区小、残余应力小、组织优良等优点^[9]。目前有研究人员针对铝合金(AA2024-T351和AA6056-T4)航空构件,采用搅拌摩擦焊接技术实现了其良好的接头性能^[11]。

美国Eclipse公司在Eclipse N500中小型商用客机的机身,包括飞机蒙皮、翼肋、弦状支撑、飞机地板以及结构件的装配等基本全部利用搅拌摩擦焊技术制造,70%的铆接被焊缝替代,不仅极大地提高了连接质量,而且使生产效率提高了近10倍,生产成本大大降低。

波音公司和洛克希德·马丁公司分别将搅拌摩擦焊技术用于C-17和C-130运输机地板的制造,生产成本降低了约20%。空客公司已经开始将搅拌摩擦焊应用于大型民用飞机的制造中。2005年8月26日,据Speed News报道,空客公司已经致力于将搅拌摩擦焊技术引入到A340飞机的制造中,并大规模应用于A350的制造,到2007年,空客公司将搅拌摩擦焊技术用于

A340-500s及A340-600s的机身纵缝连接,以取代传统的铆接技术。空客公司声称,使用搅拌摩擦焊技术代替铆接技术制造飞机机身,每米焊缝能够减重0.9kg。表1列举了欧洲近年来搅拌摩擦焊技术大型国际合作项目的研究。

(4) 扩散焊。扩散焊接已广泛用于先进飞机的机翼、舱门、机身隔框、发动机转子叶片、导向叶片、涡轮盘、喷管整流罩、风扇叶片、工字梁等重要部件的连接。例如在一轰炸机上就有66个用扩散焊接的Ti-6Al-4V合金的构件,其中机翼是承载负荷最重的结构,也是目前最大的扩散焊接的复杂结构。现在热等静压扩散焊接工艺已成功地连接了由AISI 4340与Inconel 718合金制造的涡轮转子。用固相扩散焊接制造的Udiment 700、TD-NiCr等高温镍基合金空冷涡轮叶片也已装机运行。目前119先进发动机双性能镍基合金粉末盘、轮缘与轮心的连接也采用了扩散焊接。用超塑成形-扩散连接(SPF/DB)生产线制作的钛合金辅助舱门、机身隔框、前置翼、隔热板等构件已安装在B-1、B-2、F-18和T-39等飞机上。欧洲设计的EFA战斗机前机身的大部分结构均为SPF/DB结构件,两翼的翼片也由SPF/DB的钛合金制造。现在美国麦道公司已建成大型厂房,可生产0.8m×7m或1.8m×2m的结构件。英国航宇公司为A310和A320客机采用SPF/DB技术生产了1500件封严罩,已安全飞行50000h。美国为T38飞机研制成功了4层结构主起落架舱门,上述结构件与铝、钢构件相比,可减重20%~40%,制造成本降低30%~50%^[12]。扩散焊的应用范围很广,针对异种金属的焊接也出现了很多研究成果,例如,不锈钢和钴铬钨硬质合金^[13]、低合金钢和镍基超耐热合金^[14]、304不锈钢和纯钛合金^[15]、

表1 欧洲搅拌摩擦焊技术大型国际合作项目

项目简称	项目名称	所属框架计划	经费 / 万欧元
TANGO	宇航工业近期商业目标技术应用(飞机机身结构的搅拌摩擦焊及激光焊接技术研究)	FP5 (2000 ~ 2004)	8461
WAFS	飞机框架结构的搅拌摩擦焊	FP5 (2000 ~ 2003)	506
AGEFORM	民用飞机壁板的时效成形	FP5 (2002 ~ 2005)	312
WEL-AIR	飞机框架结构的短距离焊接概念	FP6 (2004 ~ 2007)	504
COINS	低成本的飞机整体金属结构	FP6 (2006 ~ 2009)	534
DATON	新结构制造中创新方法的疲劳和损伤有限设计方法	FP6 (2005 ~ 2008)	281

钛合金焊接到其他材料^[16-18]等。

2 发动机

发动机典型的焊接构件包括压力机、燃烧室、燃气涡轮、加力燃烧室、外涵道和燃油导管等。

(1) 电子束焊。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级盘和第4~6级盘鼓、苏-27的AЛ-31Ф涡扇发动机高压压气机的第1~3级盘和4~6级盘均采用了电子束焊接技术。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、制造精度和使用寿命均得到改善,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,由此可见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^[3]。

在航空制造业中,电子束焊接技术的应用,大大提高了飞机发动机的制造水平,使发动机中的许多减重设计及异种材料的焊接成为现实,大大

提高了发动机的性能和制造水平,同时为许多整体加工难以实现的零件制造提供了一种加工途径^[19]。

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,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,可以实现数控编程一次完成焊接,生产效率高,焊接质量好。采用焊接结构大大减轻了风扇的重量,为了更进一步减轻,在保证机匣强度和刚性的情况下,使机匣壁厚减薄。由于机匣焊后其气流通道无法再进行加工,风扇机匣的电子束焊接首先要选择合适的焊接参数,使钛合金材料焊接实现单面焊双面成形,焊接时不能产生严重的焊接飞溅物,且焊缝背面堆高不能太大,否则会对机匣流道中气体的运动产生影响;然后采用合适的焊接工艺方案及焊接热处理工装,确保零件焊后变形最小;最后编制合理可行的数控程序,完成零件的焊接。采用电子束焊接方法加工的某机1、2、3级机匣使用情况良好^[20]。

(2) 线性摩擦焊。线性摩擦焊是待焊工件在电机或液压驱动下,

作相对直线往复运动。工件接合面在压力下接触并互相摩擦,使机械能转化为焊接所需的热能,在顶锻力作用下形成固相接头。P·W公司为先进战斗机ATF/F22研制的推重比为10的F119-PW-100发动机,其6级轴流高压压气机整体叶盘的第1、2级为钛合金,叶片和轮盘就是用线性摩擦焊将其焊成一体^[21]。R·R公司与MTU公司从2000年开始用线性摩擦焊加工EJ200的1~3级风扇盘(原风扇盘和压气机1级的钛合金整体叶盘采用EBW焊接)^[22]。

(3) 惯性摩擦焊。惯性摩擦焊是利用飞轮惯性存储的机械能,驱动待焊工件作相对高速旋转,工件接合面在压力下接触并互相摩擦,使飞轮储存的动能转变为焊接所需的热能,在顶锻力作用下形成固相接头。由于这一焊接过程的力学冶金效应和自清理作用可使晶粒细化、组织致密、并转化为锻造组织,不存在偏析、裂纹、气孔等焊缝缺陷,因此可以获得与母材等强乃至超强的结构强度,还可以适应不同材料的焊接^[23]。惯性摩擦连接工艺能够满足发动机转子鼓筒焊接的所有技术和经济指标要求^[24]。

3 机载设备

机载设备是飞机上保障飞行和完成特定功能的各种设备的总称,包括飞机保障设备、动力装置设备、电子设备和武器系统设备等。机载设备涉及的技术领域十分广阔,除传统技术外,还包括现代科学技术中的红外、超声、激光、电子技术和计算机技术等。在每一系统中都有焊接构件或焊接元器件^[1]。

机载设备中焊件结构特点是精密、尺寸小、特殊性能要求的项目多;焊接技术应用的特点是涉及的焊接方法多,除了常规的熔焊、电阻焊和钎焊之外,还有激光焊、等离子弧焊和扩散焊等;焊接材料中包括弹性

合金、磁性材料、银接点等各种用途的材料。机载设备更新换代十分迅速,朝着多功能和小型化方向演变,从而使结构形状复杂化,许多构件只能用焊接方法来制造。除了对材料的性能提出了更高的要求外,如要求强度高,韧性好,并能够在高温、高压、高速、重载荷、腐蚀介质条件下长期可靠地运行,同时对焊接技术也提出了更高的要求。

4 航空电子器件

在航空电子器件的连接技术中,软钎焊技术已成为主要的连接技术。再流焊是目前电子工业中使用最广的一种焊接方法,也是表面组装技术工艺的关键技术之一,再流焊中焊接质量与焊接温度有直接联系,所以再流曲线的设置很重要。目前,应用最广的再流焊接方式是红外再流焊接,激光软钎焊也有部分应用,针对激光软钎焊的研究大部分还处在实验室研究阶段。

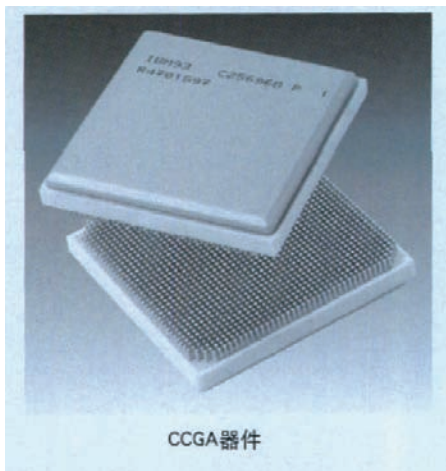
随着电子行业的“无铅化”的进行,美国国家航空航天管理局为对研究空间应用中无铅钎料提供了资助,如果在航空航天的焊接中采用无铅钎料,无铅焊点的可靠性问题将会成为航空航天工业的首要问题,特别是焊点可靠性的评估问题。由于焊点的尺寸过小,也给焊点可靠性的研究带来了很大的困难,有限元模拟可以弥补这一缺陷^[25]。

针对不同的电子器件,以及不同的表面镀层,焊点的服役情况将会出现很多“未知因素”,例如锡须问题^[26]。这就是军用设备仍然将传统的SnPb尤其是高含铅量钎料(如Sn90Pb、Sn95Pb等)应用于军用电子产品的原因,但是,随着未来电子工业和航空航天工业的发展,民用电子的进步必然会深深影响军用电子的发展,军用电子所面临的无铅应用以及随之带来的无铅焊点可靠性问题将会是军用设备的首要研究课题。

我国航空器焊接技术发展现状

国内焊接技术在飞机及发动机上的应用与国外相比还有一定的差距,但近年来也取得了长足的发展。电子束焊接技术主要应用在飞机结构和发动机零部件中。

西飞公司生产的H6和Y7系列飞机,焊接的主要承力结构件是飞机的主起落架和前起落架零组件,焊接工艺均采用手工电弧焊接工艺。将来要制造的大型运输机的飞机起落架以及主承力梁、翼盒的结构骨架和发动机挂架等均将采用焊接结构。另外,第一飞机设计研究院、西飞公司和北京航空制造工程研究所合作,已经将激光焊接技术成功地应用于某型飞机的钛合金腹鳍的焊接。



针对航空发动机的环形板件、薄壁筒形件、机械加工工件圆周对接环焊缝、纵焊缝的自动氩弧焊接,成都焊研科技有限责任公司在美国Jetline公司9500控制器的基础上进行二次开发,结合自身在弧焊控制方面的最新研究成果,研制出一种专门用于航空产品的弧焊控制系统。此外,国内发动机行业通过多个型号的实践,焊接技术已取得较大的进步,许多新工艺(如EBW、IFW、VB、自动氩弧焊、轨迹氩弧焊和弧焊机器人、SPF/DB、PAW及低应力无变形焊接技术等)均得到了应用。目

前已经有部分研究人员将超塑性成型和搅拌摩擦焊技术应用于大尺寸钛合金航空部件的制造^[20],部分研究成果已在波音公司取得应用^[27],该研究有望在航空工业中取得进一步推广。

结束语

与世界发达国家的航空工业焊接技术水平相比,我国航空焊接技术还有很大的差距,为满足我国正在从航空大国向航空强国快速发展的需求,还需要继续努力工作。

各种新材料的连接迫切需要研发焊接和连接的新方法、新工艺、新技术。当前,航空产品正面临着材料革命。各种新材料在航空工业上的应用正在快速发展,现有的一些焊接与连接强度只能达到母材的40%~60%,已经成为了制造中的薄弱环节,迫切需要发展新的焊接与连接方法。近年来,国外新发展的如搅拌摩擦焊、复合焊等新焊接方法都反映了这个大趋势。

航空产品的结构愈来愈复杂,对性能和可靠性的要求愈来愈高,要求的寿命则愈来愈长,焊接正在从粗加工向精加工工艺方向发展,各种焊接方法的过程精细控制已成为必需。因此,焊接过程的质量传感、信息处理和现代控制是焊接设备未来发展的必然趋势,焊接设备数字控制是今后的发展方向。

航空产品现在已由单件生产转向量产和批产,焊接自动化已成为当前的需要。因此焊接专机和焊接机器人柔性自动化已经成为近中期工厂焊接技术改造的主要内容之一,为了适应今后全数字化制造的要求,在实现焊接专机和焊接机器人自动化中要考虑采用网络技术,预留网络接口。

本文有参考文献27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 岩石)