



郭德伦

研究员,博士生导师,中航工业焊接技术首席专家,北京航空制造工程研究所副总工程师。主要从事焊接应力和变形控制技术的研究和设备开发,主持完成了多项新型焊接技术的研究工作,发明了“低应力无变形”焊接技术,获得了国家发明奖和省部级科技进步奖、光华基金奖等。

焊接技术最早出现在 19 世纪末到 20 世纪初电气产业革命时期的西方国家,历时 100 多年的发展,现已成为现代制造业中不可或缺的加工手段^[1]。它是将两种或者两种以上材料(同种或者异种)通过原子或分子间的结合和扩散形成永久性连接的工艺过程。发展至今,各种焊接工艺技术近百种,几乎采用了力、热、电、光、声及化学等一切可以利用的能源。

欧美俄等传统工业强国在焊接新技术开发、焊接专用装备研制,以及焊接自动化水平方面一直保持着巨大的优势。目前,各种焊接技术已

国外先进焊接技术在航空领域的应用进展

Application Development of Advanced Foreign Welding Technology in Aviation Industry

中航工业北京航空制造工程研究所 郭德伦

国外 F-22 和 F-35 等第四代战机、高超音速飞行器及其发动机等先进航空装备均已投入使用,焊接技术以其可制造整体化、轻量化、耐高温等构件,生产效率高、成本低等优点,在国外航空装备的研制过程中发挥着不可替代的作用。同时,国外航空装备的研制也促进了焊接技术的发展,新焊接方法、新焊接结构层出不穷。特别是高能束流焊接、固相焊接等技术已成为飞机和发动机结构研制的重要焊接方法。

广泛应用于航空飞机与发动机结构中。焊接结构件在发动机零部件总数中所占比例已经超过 50%,焊接的工作量占发动机制造总工时的 10% 左右。本文介绍了近期国外焊接技术在飞机和航空发动机领域的应用情况。

机身结构

1 搅拌摩擦焊

国外铝、钛等薄壁轻质合金结构件搅拌摩擦焊技术发展成熟,已经在飞机承力结构方面实现了大规模应用。在大型飞机机体上,美国洛克希德·马丁公司和波音公司在 C-130J、

C-17 大型军用运输机货舱地板的制造中率先采用了搅拌摩擦焊技术。空客公司将搅拌摩擦焊用于大型飞机机身蒙皮制造, A350 机身蒙皮数量由 A330 的 7 块变为 4 块,每米连接长度减重 0.9kg,结构连接重量减少了 40%,制造周期减少了 20%。美国月蚀公司在 21 世纪初就已研制出了世界上第一架全搅拌摩擦焊飞机——Eclipse-500 型商务飞机如图 1 所示,并取得了 FAA 认证。采用搅拌摩擦焊制造了飞机蒙皮、翼肋、弦状支撑。单架飞机共用 263 条、总长 136m 的搅拌摩擦焊焊缝代替 7378 个铆钉,制造效率比自动铆接快 6



图1 全搅拌摩擦焊飞机Eclipse-500

倍,比手动铆接快 60 倍。

2 钎焊

国外已将金属蜂窝钎焊结构成功用于飞机结构的制造中。在“70型”飞机的防火隔墙上采用了面积达 30m^2 的钛合金蜂窝夹层结构,第四代战斗机 F-22 猛禽的发动机左右前后共 4 个舱门均采用了钛合金蜂窝壁板结构,左右两个前舱门尺寸为 $1.22\text{m} \times 0.762\text{m}$,左右两个后舱门尺寸为 $1.83\text{m} \times 1.22\text{m}$ 。在大型军用运输机 C-17 及大型客机 B737、B747、B777、B787、A320、A330、A380 等发动机短舱排气喷嘴部位采用了轻质钛合金消音蜂窝壁板结构。此外, X-38 方向舵采用 ODS 合金 (PM1000) 蜂窝夹层结构(图 2),使用温度可以达到 1200°C ,而 X-33 背风面采用了 1333 块高温合金蜂窝预



图2 X-38蜂窝结构方向舵

封装式金属热防护结构。

3 激光焊

美国、加拿大、德国等政府 2006 年公布的科技发展计划中均将激光焊接技术列为航空工业尖端发展技术之一。激光焊接航空结构的标志性应用是空客 A380 飞机机身铝合金下壁板,与铆接结构相比,其减重约 18%,降低成本约 21.4%~24.3%,如图 3 所示。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。空客公司利用激光焊接实现了飞机高强铝合金内隔板的制造。

4 电子束焊

在航空领域,真空电子束焊接技术由于具有真空环境下焊接、焊缝纯净、质量高、深宽比大、变形小等众所周知的诸多优点,一直是制造飞机、发动机重要零部件的首选技术之一。电子束焊在国外飞机承力构件上的应用主要包括各种型号飞机的钛合金翼盒、大梁、壁板等结构。如:F-14 战斗机钛合金中央翼盒、“狂风”战斗机的中央翼盒、F-22 飞机钛合金前梁与后机身钛合金梁,及伊尔-76 等运输机起落架套筒、旋转轴、连杆等结构,均采用了电子束焊接技术。

发动机结构

1 钨极氩弧焊

钨极氩弧焊方法作为一种传统的技术,具有良好的工艺适应性和较低的成本。国外采用钨极氩弧焊方法进行了航空发动机叶片的修复。例如:法国 snecma 公司采用钨极氩弧焊方法修复发动机风扇叶片上磨损的凸肩,GE 公司为了较好地解决整体叶盘补外物打伤的问题,对于那些小的掉块,采用氩弧焊堆焊将缺口补上^[2]。

2 线性摩擦焊

国外,线性摩擦焊已经用于 Typhoon 战斗机发动机 3 级低压气机整体叶盘(图 4)的制造并取得成功,目前已经提供了 100 多个线性

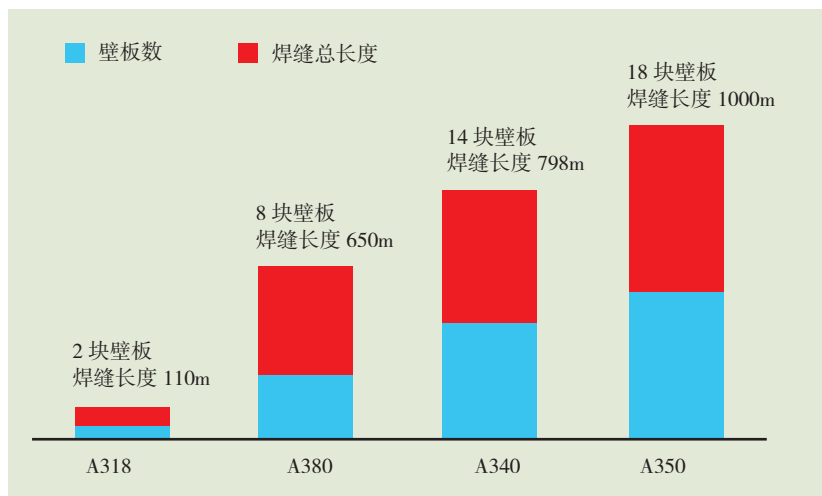


图3 激光焊接壁板在空客A3××系列上的应用

摩擦焊焊接的整体叶盘。F119 发动机风扇和压气机 1~2 级均采用罗·罗公司研制的线性摩擦焊整体叶盘结构^[3]。F135 发动机升力风扇以及一、二级风扇也是罗·罗公司提供的线性摩擦焊整体叶盘^[4]。此外,线性摩擦焊整体叶盘在民机方面也有应用,日本开展的一项小型民用飞机发动机的研究计划中,其高压压气机整体叶盘采用了线性摩擦焊制造^[5]。

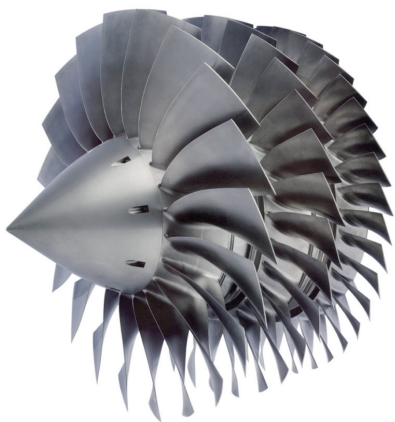


图4 线性摩擦焊整体叶盘

3 惯性摩擦焊

在国外,航空发动机公司已经将惯性摩擦焊作为航空发动机高温合金和粉末高温合金整体转子部件标准焊接的主要工艺方法,并应用于高推比、大型航空发动机的制造。例如:采用惯性摩擦焊制造的压气机具有强度和刚度大、重量轻(F101 发动机一二级盘减重 29%,CF6 发动机钛合金盘减重 26%)、可靠性高、成本低等优点。

4 钎焊

美国、英国、俄罗斯等国在高温合金部件真空钎焊方面已经成熟,并在钎料和钎焊工艺方面实现不断创新与发展。例如:用于波音 707 客机和 B-52 重型轰炸机的 JT3D—3B 发动机叶片与内环的连接。此外,炉中钎焊技术还广泛应用于航空发动机零部件修复,例如:美国 GE 公司采用的一种活性钎焊方法已成功修复了燃气涡轮部件,包括各种第 1、2 级

高、低压涡轮导向器裂纹及磨损。加拿大 Liburdi 公司采用粉末钎焊技术修复的航空发动机叶片已达到与新叶片同等寿命。美国采用 SiC 基复合材料制备了燃烧室内衬、火焰筒及涡轮叶片等构件,并实现了其与高温合金部件的钎焊应用。此外,感应钎焊技术成功用于燃油、润滑油、通气等管路的焊接。

5 扩散焊

国外扩散焊技术已应用于铝基、镍基、铁基、钛基、单晶、金属间化合物、金属基复合材料、陶瓷等材料同质与异质连接及其构件的制造。利用热等静压扩散焊接工艺已成功地连接了由 AISI 4340 与 Inconel718 合金制造的涡轮转子。用传统固相扩散焊接制造的 Udiment 700、TD-NiCr 等高温 Ni 基合金空冷涡轮叶片已装机运行。目前,F119 先进发动机双性能 Ni 基合金粉末盘(轮缘为粗晶组织,以满足损伤容限要求,轮心为细晶组织以满足强度与低周疲劳性能要求)轮缘与轮心的连接采用了扩散焊接。此外,采用 TLP 扩散焊技术研制出第三代镍基单晶与 NiAl 单晶涡轮分体组合叶片、单晶超冷叶片、多孔层板燃烧室等构件已经在 F404、F119、F120、F135 等发动机中成功应用。

6 激光焊

国外十分重视发动机结构激光焊接和焊接修复的发展,尤其是高温合金、钛铝金属间化合物等新型高温结构材料的激光焊接与修复技术,欧盟第六框架研究项目 AROSATEC 就开展了压气机定子与叶栅、高压和低压叶片出口与盖板连接,以及涡轮机匣的激光焊接技术的相关研究。激光焊接修复技术用于发动机零部件恢复尺寸修复,利于近净成形,减少裂纹产生,已应用的有航空发动机涡轮叶片、导向叶片和气路封严系统的零部件。

7 电子束焊

国外在航空先进的发动机制造中,为了减轻结构重量,将电子束技术用于航空发动机风扇及压气机转子间的连接,以及各类机匣的焊接等。此外,大型客机 A340、A500、A600、A380 等发动机吊架结构也采用了电子束焊接技术。

建议

与国外航空焊接技术相比,我们还有较大的差距。结合国内航空焊接技术的现状,应重点开展如下工作:

(1) 应注重新型焊接技术以及新材料、新结构的焊接基础研究工作,如:高强高温钛合金、钛铝系金属间化合物、复合材料等新型高能束流、新型固相焊接等。加强理论研究工作,揭示其接头的冶金过程,建立焊接工艺数据库。

(2) 焊接技术的研究重点应该向“高精度控形、低损伤控性”的方向转变。未来,航空飞行器结构将更为复杂、成形精度和性能要求更高。因此,在航空结构的制造过程中,不但要注重焊接结构的尺寸精度等“控形”问题,而且还需要注重焊接结构的冶金过程和接头缺陷控制等“控性”问题。

(3) 应加强以焊接技术为主导的集成制造技术。这是实现产品整体化、轻量化、高效率 and 低成本,并保证产品满足性能要求的重要前提。

参考文献

- [1] 唐伯钢. 展望 21 世纪的我国焊接技术和焊接产业. 焊接技术, 2001, 30: 2-4.
- [2] 陈光. 航空发动机结构设计分析. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [3] 魏钢. F-22 “猛禽”战斗机. 北京: 航空工业出版社, 2008.
- [4] 魏钢. F-35 “闪电” II 战斗机. 北京: 航空工业出版社, 2008.
- [5] Research and Development for an Environment-friendly Small Aircraft Engine. Aircraft and Space Technologies.

(责编 叶枫)