

焊接技术在大飞机机体研制中的应用及展望

Application and Prospect of Welding Technology in Large Aircraft Fuselage

沈阳航空航天大学 卓彬 姬书得
北京航空航天大学 王磊 柴鹏



卓彬

硕士,现就读于沈阳航空航天大学,专业为航空工程。主要从事搅拌摩擦点焊接工艺及无损检测研究,在国内外发表论文4篇。

飞机装配过程即把组成飞机的零件装配成组合件、部件和整机的过程。由于其零件数量多,各种零、部件之间不可避免的需要进行连接。飞机装配过程中的连接质量极大的影响飞机的使用寿命。据统计75%~80%的疲劳破坏发生在零部件的连接部位,严重降低了飞机使用寿命。

大飞机通常具有机体尺寸大、可靠性较高、使用寿命长(飞行时间超过90万h)等特点。为满足其飞行性能要求,越来越多的轻质高强材料被大量用于大飞机的生产研制。本文分别介绍了大飞机装配过程中的几种先进的连接技术,并阐述未来可能应用于大飞机研制的焊接技术。

大飞机通常具有机体尺寸大、可靠性较高、使用寿命长(飞行时间超过90万h)等特点。因此,为满足大型飞机的性能要求,钛合金、复合材料等轻质材料被大量用于生产大飞机的零部件。波音787上钛合金和复合材料的用量分别达到15%和52%,空客A380飞机上钛合金的用量接近10%^[1]。传统的连接方法由于自动化程度较低,稳定性差,很难满足这些新型材料的加工工艺要求。因此,研究先进连接技术在大型飞机生产制造中尤为重要。

大飞机焊接技术

焊接是将2种或2种以上的同种或异种材料通过原子或分子间的结合和扩散连接在一起的工艺过程。

一般分为液相焊接(高能束焊)、固-液相焊接(电阻点焊)以及固相焊接(搅拌摩擦焊)。

由于焊接工艺标准不断完善,越来越多的焊接产品走向市场,使得焊接技术成为现在制造业不可或缺的一部分。焊接技术因其不增加结构件重量,在航空航天工业得到迅速的发展和应用。

1 激光焊接技术

激光焊接作为一种先进的液相焊接技术,具有加热范围小、焊接速度快、生产率较高、焊后的残余应力和变形较小等优点,便于实现高精度焊接。因此,激光焊接技术被誉为“21世纪先进制造技术之一”^[2]。

Xiaofeng Sun^[3]等对激光焊接建立了焊接模型,研究了工艺参数对焊

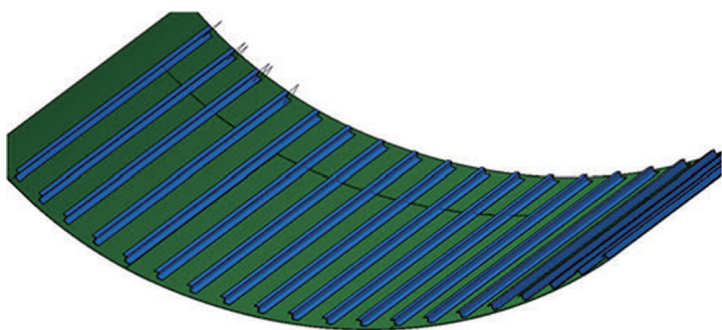


图1 典型纵桁连接结构模型

接状态的影响。图1为一典型的纵桁连接的结构模型。

Karl-Hermann Richter^[4]等人研究了航空发动机材料的激光加工技术。认为激光焊接技术在航发动机焊接方面应用较少,但在航空发动机涡轮叶片修复方面,激光焊接有着不可替代的作用。

目前激光焊接技术已经成功的应用于机翼的内隔板、飞机机身与加强筋的连接。并取代铆接技术,使得飞机的重量大幅度降低,如空客A380飞机在引进激光焊后机身总重减少18%,从而减少油耗以及排放,降低运营成本。

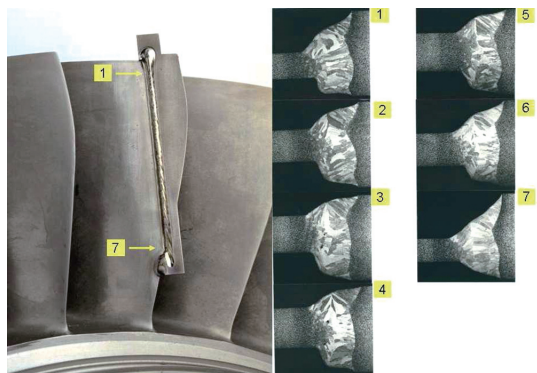


图2 激光修复涡轮叶片

在激光焊接过程中,焊接控制和焊接质量预测的关键是建立熔池形状与焊接工艺参数之间的关系。天津大学的陈斌^[5]对钛合金激光焊搭接接头疲劳断裂位置以及疲劳强度进行了研究。结果表明,激光焊的疲

劳断裂位置出现在热影响区,且疲劳强度达到41.3MPa。由于激光焊接过程中的焊接温度过高,TC4母材中细小 $\alpha+\beta$ 等轴晶焊后转变为 $\alpha+\beta$ 和 α' 马氏体交叉混合的不均匀和粗化组织结构,影响了接头的力学性能。因此,对于激光焊接这种高能束焊接技术来说,如何实现快速焊接与快速冷却的结合是防止热影响区晶粒长大的有效方法,对于提高接头的力学性能有显著的作用。

哈尔滨工业大学的杨志斌^[6]等人对铝合金机身壁板结构的双侧激光焊接进行研究。结果表明提高焊接速度与严格控制光束间距可有效

抑制气孔缺陷。焊丝与激光束的相对位置关系影响焊丝稳定熔入。在工艺参数设计合理,焊接过程稳定的条件下,焊接速度最大可达12m/min。

北京工业大学的蔡华^[7]等人研究了薄板2524高强铝合金激光焊接接头的组织及力学性能。结果表明,薄板2524铝合金光纤激光焊接气孔倾向很小,但是裂纹倾向大。通过使用含稀土Er和变质元素Zr的Al-Mg焊丝,可获得无缺陷焊接接头。

近年来,激光复合焊接技术因其热输入小、零件变形、焊后残余应力

小、装配精度要求低等优点而被广泛研究。上海交通大学的臧昊^[8]等人利用大功率CO₂激光器,研究了飞机壁板2024铝合金材料的激光焊接性。研究发现采用纯激光焊接时,由于铝合金材料反射激光严重,能量吸收率较差,导致焊接过程供热不足,成型差。而采用TIG电弧与激光能量进行耦合,可以增强材料对于激光能量的吸收率。激光复合焊下材料对于激光能量的吸收较为均匀,未出现能量吸收率的突变以及明显的阈值现象,并且焊缝成形较为连续,焊缝质量较好。

在焊接发动机机匣类零件和钛合金结构件方面具有独特优势。在进行普通激光焊接的过程中,由于铝合金的热膨胀系数较大、弹性模量较小,对于蒙皮这种多道焊缝结构件会出现焊接应力分布比较复杂,导致焊接过程中产生失稳变形^[9]的问题。采用激光复合自动化焊接工艺是保证工艺过程稳定并控制零件变形、保证焊接工艺一致性和稳定性的最直接方法^[10]。

2 电子束焊接技术

电子束焊接技术在真空环境下进行焊接,焊缝纯净。焊接过程中电子束的能量密度高,焊缝深宽比大、焊接变形小、可控精度高,是一种先进的高能束流加工焊接技术^[11]。

大飞机的研制,需要采用大型、专用、控制精度高、自动化程度高的电子束焊接设备。电子束焊接技术的焊缝质量轻、精度高、强度好、构件的整体化制造水平高等优点适用于制造飞机零部件。

目前,国外已经将电子束焊接技术成功应用于飞机起落架焊接。波音727以及Aermet100的起落架均使用电子束焊接技术。虽然采用整体锻造数控加工制造出来的飞机大厚度整理承力框尺寸精度高、使用寿命长等优点,但受国内大型锻造设备的局限,无法锻造大型整体框结构,

尤其是钛合金等高强合金。

北京工业大学的芦伟^[12]等人对应用于飞机重要承力框梁结构的TC4-DT的钛合金材料进行了研究。结果表明,厚壁钛合金电子束焊接接头沿横向和焊缝深度方向显微组织与力学性能不均匀。与传统熔焊相比,电子束焊接接头用第1级评定的边界条件可从 $\delta_M=10\%$ 扩宽到 $\delta_M=30\%$ 。

采用电子束拼接的方法是符合当前国内制造水平的良方。国内也已经将电子束焊接技术成功的应用于军用发动机的制造,并且正在试图将该技术应用于大飞机的发动机以及大飞机机身主要承力结构件的连接。

3 搅拌摩擦焊接技术

搅拌摩擦焊接技术是英国焊接研究所于20世纪90年代初发明的一种能够实现同种或异种材料连接的固相焊接技术。它是利用一个高速旋转的硬质合金搅拌头插入被焊工件并且不断剪切摩擦被焊材料,使被焊材料软化,进而使被焊材料之间相互扩散或发生化学反应而达到连接的目的。经过30多年的长足发展,搅拌摩擦焊接技术作为整体化制造方法已经逐渐成熟并得到广泛的应用。其中,在航空领域已经得到应用的机型有空客A340、A350以及A380等。

王运会^[13]等人研究了航空发动机铝合金叶片的搅拌摩擦焊技术。研究表明,搅拌摩擦焊技术能很好



图3 平直对接搅拌摩擦焊制造的飞机带筋结构

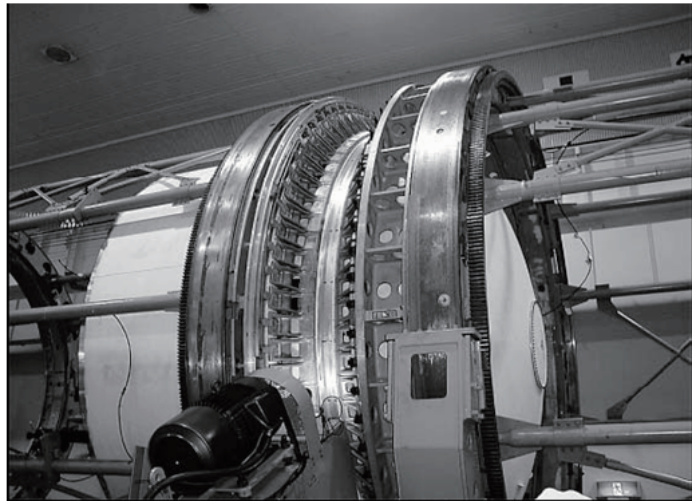


图4 $\phi 5.2\text{mH-II B}$ 火箭贮箱环缝的BFSW焊接

地试验铝合金叶片本体与镶条的锁底结构单面和双面连接,且焊后变形小,接头结构稳定。焊接参数设计合理的条件下能够获得无缺陷铝合金叶片本体与镶条锁底连接接头。

目前,国内运用搅拌摩擦焊接技术不仅能够实现大型飞机型材地板等结构的高强度连接,还能实现飞机蒙皮平直结构的纵向焊缝对接。图3所示为平直对接搅拌摩擦焊制造的飞机带筋结构。例如,北京航空制造工程研究所使用搅拌摩擦焊接技术实现了XX飞机结构的焊接,经检测该部件强度完全能胜任该机型飞机的飞行要求。

虽然搅拌摩擦焊接技术具有焊接过程中热输入较少,焊后无变形,残余应力较低,焊接质量稳定且不增加被焊接件重量等优点,但“匙孔”的存在阻碍了该项技术的推广。研究人员在实际应用中,在焊缝尾部添加相同材料的导出块,以期将“匙孔”导出被焊接件。最后,将多余的部分铣除。此方法虽然解决了“匙孔”问题,但增加了工序和设备,提高了成本。还有研究人员将搅拌头设计成可相对运动的搅拌针和轴肩,在焊接临近结束时轴肩仍然紧紧压住工件,搅拌针除了随着焊接方向向前移动之外,还向上回抽,达

到消除“匙孔”的目的,此方法逐渐得到了推广。

为了实现复杂空间曲面结构的零部件的焊接,国外开发了双轴肩搅拌摩擦焊接技术。该技术以其焊接过程中不需要另加刚性支撑,接头产热、受力均匀、变形小,且不会出现背部未焊透缺陷而得到了广泛的应用。目前波音、洛克希德·马丁等公司已经将双轴肩技术应用火箭贮箱环缝焊接(如图4所示),并且获得与常规搅拌摩擦焊接相近的接头性能。未来,该技术可能会在大型飞机复杂结构的连接中得到推广。

由搅拌摩擦焊接原理引出的回填式搅拌摩擦点焊技术由于接头质量较高,焊点的剪切强度达到 $8\text{kN}^{[14]}$ 且焊后表面光滑,无需对焊点进行工艺后续处理。

搅拌摩擦点焊在飞机关键结构上应用可以优化飞机结构,减轻飞机重量以及提高隐身性能等。

其中在大型飞机机身上应用可以实现每一米焊接结构减轻 0.9kg 重量,减重效果非常明显。其中,洛克希德·马丁公司将搅拌摩擦点焊代替铆接应用于美国F22战斗机机翼结构降低了17.5%的重量。

由于国内拥有搅拌摩擦点焊设备较少,目前仅有北京航空制造工程

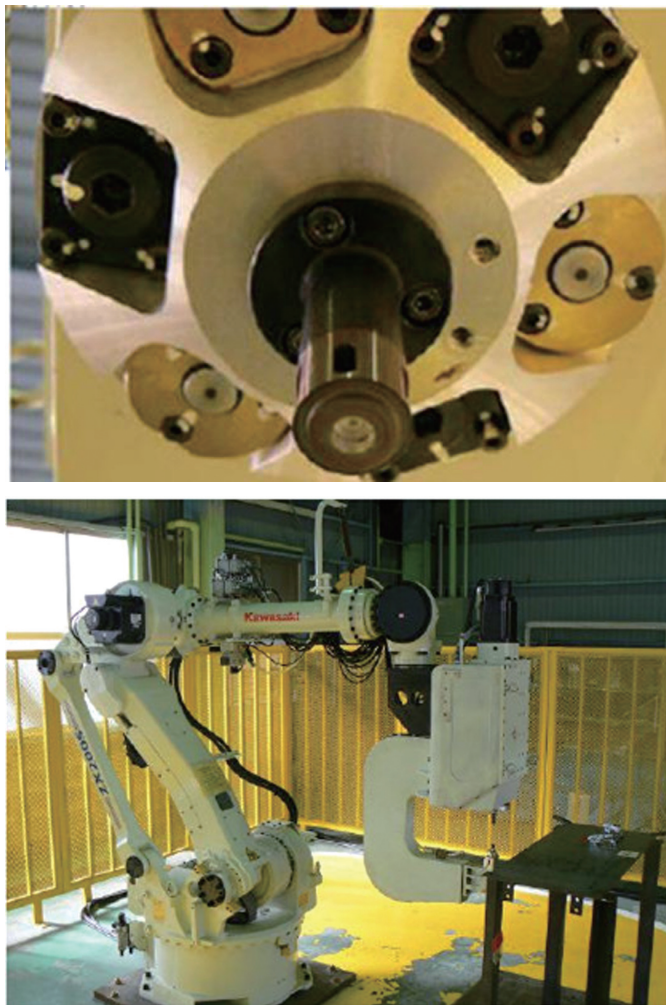


图5 川崎重工搅拌摩擦点焊机器人

研究所拥有几台设备。因此,该项技术在国内发展较为缓慢。在日本、德国等工业化程度较高的国家,该项技术已经在汽车制造业等行业得到了广泛的应用^[15],并且逐渐向航空航天工业渗透。

虽然搅拌摩擦点焊技术被证明连接质量较好,但由于焊接过程中较多的热输入导致蒙皮发生变形,影响飞机行进过程中的空气流动性,焊后需要矫形。因此,搅拌摩擦点焊应用于飞机关键结构件的连接,还需要进一步优化工艺,尽可能减小变形。另外,为实现搅拌摩擦点焊在飞机制造中更具柔性化,应将该技术与机器人技术结合起来。图5所示为日本川崎重工研发的搅拌摩擦点焊机器人设备,该设备能

够成功实现复杂零部件的搅拌摩擦点焊连接。

未来在大飞机蒙皮的连接上,用搅拌摩擦点焊技术取代传统的铆接技术是不可阻挡的趋势。

结束语

鉴于大飞机对复合材料以及高强度合金材料的需求量日益增多,使得大飞机对机体零部件之间的连接强度要求越来越高。加之,飞机装配自动化的趋势不可阻挡。因此,传统的手工定位或半自动定位必定会被先进的连接技术所取代。其中自动钻铆技术以及电磁铆接技术已经较为成熟,在国外先进的飞机制造公司已经实现规模化应用。

高能束焊接技术对于大飞机结

构件的制造具有重要推进作用,有待进一步的研究发展。搅拌摩擦焊接技术目前还仅仅局限于飞机座舱地板等承力较小的部位,如果要应用于大飞机关键部位连接,仍然有很长的路要走。

参考文献

- [1] 曹增强. 应对我国大飞机研制的装配连接技术. 航空制造技术, 2009(2):88-91.
- [2] 周金亮. 铝合金激光焊接技术特性[D]. 山东: 山东大学, 2012.
- [3] Xiaofeng Sun, Essam Shehab, Jörn Mehnert. Knowledge modelling for laser beam welding in the aircraft industry. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013(66):763-774.
- [4] Richter K H. Laser material processing in the aero engine industry. Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics. April 2008(In Beijing), 1005-1010.
- [5] 陈斌. TC4 钛合金高能束流焊接接头组织与疲劳性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [6] 杨志斌. 铝合金机身壁结构双侧激光焊接特征及熔池行为研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] 蔡华. 薄板 2524 高强铝合金光纤激光焊接接头组织及力学性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [8] 臧昊. 2024 高强铝合金高功率 CO₂ 激光焊接性能研究[D]. 上海交通大学, 2013.
- [9] 张兵宪, 朱增辉, 庄明祥, 高婷婷. 焊接技术在大飞机机体研制中的应用及展望. 航空制造技术, 2013(22):45-48.
- [10] 曲仲, 宋文清, 等. 先进航空焊接技术. 航空制造技术, 2013(11):32-35.
- [11] 毛志勇. 电子束焊接技术在大飞机中的应用分析. 航空制造技术, 2009(2):92-94.
- [12] 芦伟. 厚壁钛合金电子束焊接接头断裂安全评定方法研究[D]. 北京工业大学, 2013.
- [13] 王运会, 黄春平, 陈文亮, 等. 航空发动机铝合金叶片的搅拌摩擦焊. 机械工程材料, 2013, 7:10-13.
- [14] 吴博. 搅拌摩擦点焊接头缺陷及性能分析[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.
- [15] 乔凤斌, 张松, 郭立杰. 搅拌摩擦点焊技术及其在工业领域中的应用. 电焊机, 2012, (10):82-86.

(责编 王一)