

焊接技术在大飞机机体 研制中的应用及展望

Application and Prospect for Welding Technology in the Large Aircraft Fuselage Developing

中航飞机股份有限公司西安飞机分公司 张兵宪 朱增辉 庄明祥 高婷婷



张兵宪

高级工程师,主要从事航空产品焊接工艺及技术研究工作。在国内会议及刊物上发表论文 4 篇,获国家实用新型专利 1 项。

大飞机项目于 2006 年 2 月 9 日国务院颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006 年~2020 年)》中提出,并确定大型飞机为“未来 15 年力争取得突破的若干重大科技专项之一”。2006 年 3 月,全国十届人大四次会议上,国务院总理温家宝宣

在飞机机体的研制和生产中,焊接技术已经成为了不可或缺的工艺方法之一。焊接技术的进步与发展不仅能够减轻飞机机体的重量,而且还为飞机机体结构设计提供技术支持,提高了飞机先进性。

布,我国将在“十一五”期间启动大飞机研制项目。大飞机项目于 2007 年 2 月 26 日国务院总理温家宝主持召开国务院常务会议,原则批准大型飞机研制重大科技专项正式立项,并同意组建大型客机股份公司,尽快开展工作^[1]。时至今日,大飞机项目的提出、启动、立项到首飞,航空工业的工作者将各种制造技术应用到飞机研制,其中焊接技术是连接技术中很重要的部分,是制造技术的重要组成部分,同时也是飞机机体及发动机容器、管路和一些精密器件制造中不可缺少的技术,在现代生产和制造领域中,越来越多的产品采用各种焊接方法把不同材料、形状、结构和功能的

零部件连接成一个复杂的整体,大大简化了构件整体加工的工序,节省了材料,提高了生产效率^[2]。在飞机机体的研制和生产中,焊接技术已经成为了不可或缺的工艺方法之一。焊接技术的进步与发展不仅能够减轻飞机机体的重量,而且还为飞机机体结构设计提供技术支持,提高了飞机先进性。

焊接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。根据焊接时金属连接的冶金特点,也可以把焊接工艺分为液相焊接、固相焊接、固-液相焊接 3 类^[2]。其中,液相焊接包括电弧焊、气

焊、高能束焊和钎焊等；固相焊接有搅拌摩擦焊、闪光对焊等；固-液相焊接有电阻点焊、缝焊等。在生产现场，将焊接方法分为传统焊接工艺和新型先进焊接工艺。

传统焊接工艺

传统焊接工艺一般指电弧焊(包括手工焊条电弧焊、氩弧焊、混合气体保护焊等)、电阻焊(包括电阻点焊、电阻缝焊、闪光对焊等)、固相连接焊(包括旋转摩擦焊等)和钎焊(包括烙铁钎焊、火焰钎焊、高频钎焊等),这些焊接技术在飞机机体零件的连接上占据主导地位。

(1) 电弧焊焊接技术。

大飞机机体电弧焊焊接工艺涉及的材料有钛合金、铝合金及结构钢、不锈钢和高温合金等。其中,可焊钛合金有 TA1、TA2、TA3、TC1、TC2、TC3、TC4 及 TB5 等。针对钛合金的固有特性,如钛对氧亲和力大,在高温时具有强烈的氧化倾向,易吸收氮、氢、氧,结果使合金塑性及韧性急剧下降,且在加热温度接近或超过 β 相转变温度时,合金组织发生相变,晶粒会急剧长大,组织显著粗化,随后在冷却速度较快的情况下形成 α 相和 β 相的网状马氏体组织,使钛的塑性下降。因此,在焊接钛合金时,必须保护焊缝溶池与大气环境的隔绝,可以焊接钛合金的焊接方法有氩弧焊、惰性混合气体保护焊等。图 1 为 TB5 钛合金薄板滚弯焊管及变直径对接焊接产品。

可焊铝合金有纯铝、防锈铝合



图1 TB5钛合金焊管

金、硬铝合金、锻铝合金及铸造铝合金,主要的合金牌号有 1070A、1060、5A02、5A06、3A21、2A12、2A16、6061、ZL101、ZL104 等。由于铝合金的化学性质比较活泼,高温时与氧就会形成氧化物,故铝合金的焊接一般用氩弧焊。图 2 为 6061 铝合金半管焊接及无缝管对接焊接产品。

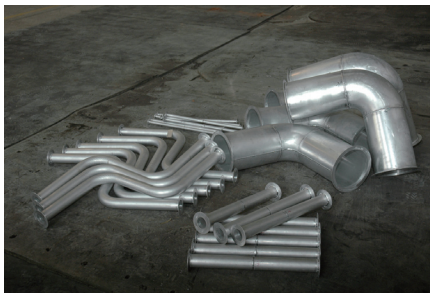


图2 6061铝合金焊管

飞机机体焊接零件常用的黑色金属材料有 20、25、30CrMnSiA, 30CrMnSiNi2A, 1Cr18Ni10Ti, 0Cr18Ni9, 00Cr18Ni10N, GH4169 等。根据材料特性、厚度及焊接结构等可以分别选择手工焊条电弧焊、氩弧焊、混合气体保护焊等方法进行焊接。图 3 为 0Cr18Ni9 不锈钢管焊接件。



图3 不锈钢焊管

(2) 电阻焊焊接技术。

电阻焊是将被焊工件压紧于两电极之间,并通以电流,利用电流流经工件接触面及邻近区域产生的电阻热将其加热到熔化或塑性状态,使之形成金属结合的一种方法^[3]。常用电阻焊焊接的铝合金有 2A12、2A16、5A06、5A02、5A03、7A04、3A21 和 6061 等,钛合金有 TA1、TA2、TA3、TC1、TC2、TC3 和 TC4 等,黑色金属有 20、25、30CrMnSiA、0Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti、

00Cr18Ni10N 和 GH4169 等。应用电阻焊焊接的产品有各类口盖、进气道壁板、进气道筒体、框上侧壁、盖板、机翼可卸壁板及导流器等。

(3) 固相连接焊焊接技术。

固相连接焊主要有旋转摩擦焊,是利用工件接触端面相对旋转运动中相互摩擦所产生的热,使端部达到热塑性状态,然后迅速顶锻,完成焊接的一种压焊方法^[3]。目前,旋转摩擦焊技术主要应用在飞机机体零件制造用各类工量具、刀具刀杆的对焊。常用材料有 W6Mo5Cr4V2A1 与 45、M42 与 45、45 与 W6Mo5Cr4V2 等异种金属对接。

(4) 钎焊技术。

钎焊是与熔焊不同的一类焊接方法,它是利用液相线温度比母材固相线温度低的金属材料作钎料,将零件和钎料加热到钎料熔化,利用液态钎料润湿母材,填充接头间隙并与母材相互溶解和扩散而实现连接零件的方法^[3]。根据使用钎料的不同,钎焊分为软钎焊和硬钎焊。目前,飞机组件及其附件采用锡铅类软钎料钎焊铜及铜合金、结构钢和不锈钢构件的烙铁钎焊;铜合金、结构钢和不锈钢采用铜基钎料和银基钎料的火焰钎焊、感应钎焊和炉中钎焊;飞机导线接头的钎焊,根据导线截面面积的不同,截面面积 0.30 ~ 16 mm² 的导线采用烙铁钎焊,截面面积 > 16 mm² 的导线采用烙铁钎焊或浸沾钎焊,导线钎焊后焊接接头的拉脱力(最小拉断力)应满足 HB6438 要求,试验时,焊点承受最小规定值后,焊点及电线加工部位不应破坏,而电线其他部位破坏,不作为不合格的依据。

新型先进焊接工艺

新型先进焊接工艺一般指真空电子束焊接技术、激光焊接技术和搅拌摩擦焊接技术,这些焊接技术在新型号飞机上的应用潜力巨大,尤其在大飞机机体制造上有了实际应用。

1 真空电子束焊接技术

电子束焊接是利用汇聚的高速电子束流轰击工件,将电子束动能转化为晶格振动,使工件迅速升温,熔化并气化母材实现焊接。电子束焊接与传统的焊接方法相比,具有以下

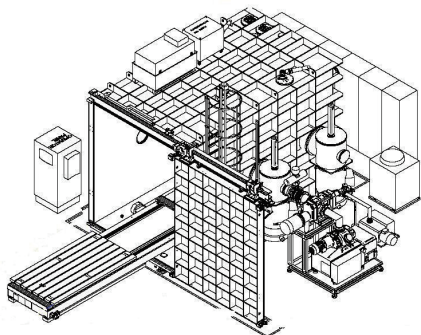


图4 GENOVA98型真空电子束焊机

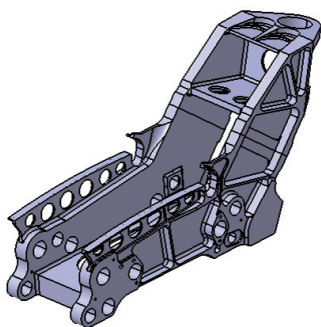


图6 滑轮架接头

特点和优势:

(1)真空条件下焊接,可排除大气中各种有害杂质元素的污染。

(2)功率密度大,束斑直径小,焊缝及热影响区小,几乎不产生粗大晶粒。

(3)焊接速度快,焊缝深宽比大,厚件可不开坡口一次成形。

(4)参数规范易于调节,工艺适应性强,焊接工艺参数的重复性和再现性好等。

大飞机研制过程中,应用真空电子束焊接技术焊接的材料有超高强度钢 30CrMnSiNi2A、钛合金 TC18 和不锈钢 0Cr18Ni9、00Cr18Ni10N 等。设备采用 GENOVA98 型真空电子束

焊机,属于中压型,功率达到 50kW,设备结构如图 4 所示。涉及的产品有襟翼滑轨、滑轮架接头、波纹管等,如图 5~图 7。

2 激光焊接技术

激光焊接是以激光为热源进行

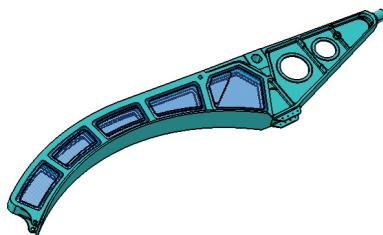


图5 襟翼滑轨

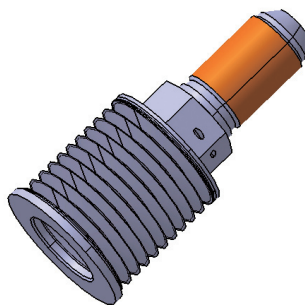


图7 波纹管

的焊接。激光是一束平行光,用抛物面镜或凸透镜聚焦,可以得到较高的功率密度,用高功率密度的激光热源进行焊接,可焊接熔深要求较大的焊缝。激光焊接作为一种先进的焊接技术,具有传统焊接方法无法比拟的优点:加热范围小,焊缝和热影响区窄,接头性能优良;残余应力和焊接变形小,可以实现高精度焊接;焊接速度快,空间位置转换灵活,可在大气环境下焊接,生产率高。激光焊与电子束焊有许多相似之处,但它不需要真空室,不产生 X 射线,且与电子束焊相比,激光焊在薄板焊接上具有更大的优势。因此,激光焊接被誉为“21 世纪先进制造技术之一”^[4]。

在大飞机机体研制中,有针对性的进行了大量激光焊接基础技术研究。对于不锈钢薄壁大型复杂结构部件,外形为双曲面复杂结构、尺寸大、焊缝长,采用手工 TIG 焊接工艺焊接此零件,焊接变形很大,焊缝外表面凹凸不平,缩沟较深,达不到设计对产品外观质量要求,而且内表面焊缝突出部分与之装配件产生干涉,装配时装配困难。不锈钢结构复杂件采用普通氩弧焊变形大、成品率低,钳工花费大量时间修配仍不能较好地保证装配精度;为减少焊接变形、提高零件表面精度,利用激光焊接的优势焊接这类产品,不但可以使得变形量大幅度降低,修配量减少,保证质量,提高生产效率,而且激光焊接后在机械性能、疲劳强度等方面较氩弧焊均有所提高,非常适合不锈钢薄板的焊接,因此具有非常广泛的推广应用价值。图 8 和图 9 为激光焊接不锈钢和钛合金薄板试件。

另外,针对 TC1 和 TC4 钛合金薄板进行了激光焊接基础技术研究,钛合金激光薄板焊接是快速和不均匀的热过程,接头微观组织具有明显的特性,而对微观组织演化的详细研究则是联系焊接工艺参数与焊后力学性能的关键桥梁,因而具有重要的理论意义。通过观察在低倍光镜和扫描电镜焊接接头微观组织,研究不同焊接工艺参数对钛合金激光焊接过程中发生的熔化、相变、结晶和凝固等产生的影响。焊接线能量对焊接接头的形成有直接影响,焊接线能量为激光平均功率 P_{ave} 与焊接速度 v 的比值,在脉冲激光焊接中因为焊接电流、脉冲宽度和脉冲频率对钛合金激光焊接的影响都是与脉冲激光的平均功率直接相关的,而焊接速度对脉冲激光的平均功率没有影响,而是与焊接线能量直接相关,因此,重点研究了焊接电流和焊接速度对焊缝质量的影响。

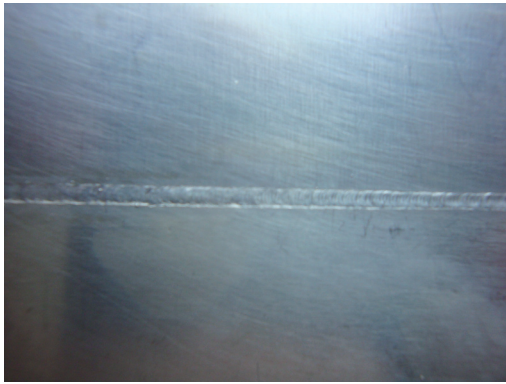


图8 激光焊接不锈钢试件焊缝



图9 激光焊接钛合金试件焊缝

目前,国外将激光焊接技术应用于飞机大蒙皮的拼接、蒙皮与长桁、翼盒、机翼与内隔板和加强筋的焊接等,用激光焊接技术取代传统的铆钉进行铝合金飞机机身的制造达到减轻飞机机身重量,提高强度的目的。这也将是国内激光焊接技术在飞机制造应用的发展趋势。

3 搅拌摩擦焊接技术

搅拌摩擦焊是一种在机械力和摩擦热作用下的固相连接方法。其焊接原理为,焊接过程中,搅拌头高速旋转着缓慢插入被焊工件,搅拌头和被焊接材料之间的摩擦剪切阻力产生了摩擦热,摩擦热使搅拌头邻近区域材料受热变软从而得到热塑化。热塑化金属在搅拌头轴肩的锻造作用下,实现了工件之间的固相连接^[5]。搅拌摩擦焊接技术被誉为“继激光焊后又一革命性的焊接技术”。

由于它的高质、低耗、环保,被认为是一项绿色焊接技术。这种焊接方法具有下列优点:

(1) 焊接过程中无需填充材料,不需要保护气,焊前不需要加工坡口,焊后表面平整,无需特殊处理,焊接所需能量仅为传统焊接方法的20%左右,所以焊接成本低。

(2) 由于焊接过程温度较低,焊件变形小,焊后残余应力较低,而且焊接区材料组织结构变化小,焊核区为细化的等轴再结晶晶粒,焊缝性能好,焊接质量高。

(3) 焊接过程无烟尘、火焰、飞溅、辐射,噪音低,是一种绿色焊接方法。

(4) 可实现异种材料的焊接并且焊接过程操作简单,安全,易于实现机械化和自动化。

但是搅拌摩擦焊也有局限性,焊件需要刚性固定,焊接完成时会留下“匙孔”,焊速还不是很,搅拌头磨损大,并且需要向被焊工件施加足够大的压力和向前的驱动力,从而限制了该技术在机器人等柔性设备上的应用,而且如果焊接参数选择不当,还会产生一些以往熔焊过程不曾出现的缺陷,如隧道孔、Z线、吻接等。

目前,大飞机货舱地板和斜台地板是由搅拌摩擦焊焊接而成的;大飞机货舱地板由中央地板和左右地板组成,其中中央地板有4条焊缝,每条焊缝19.1m左右,左右地板各有2条焊缝,每条焊缝18.9m左右;斜台地板有10条焊缝,每条焊缝6m左右,单架机焊缝总长度212m左右;焊缝外观优美,内部质量达到航空I级焊缝要求,焊缝强度为母材强度90%以上;这是搅拌摩擦焊技术首次非常成功应用到新型号飞机上的范例。预计,将来飞机蒙皮、长桁等大型零件由于减重的需求,搅拌摩擦焊技术可代替铆接达到减重目的;另外,搅拌摩擦焊技术可以应用到新舟系列飞

机民机、货机地板,蒙皮、长桁等结构的连接。图10为搅拌摩擦焊过程,图11为搅拌摩擦焊接的地板。



图10 搅拌摩擦焊过程



图11 搅拌摩擦焊接的地板

结束语

大飞机机体制造应用了大量的焊接结构和焊接产品,焊接方法的选择主要集中在传统焊接技术,新型焊接技术也有了应用,尤其搅拌摩擦焊技术首次应用到飞机产品的制造上。

参考文献

- [1] 楼瑞祥. 大飞机用铝合金的现状与发展趋势. 北京: 中国航空学会2007年学术年会材料专题, 2007:1-8.
- [2] 王亚军, 卢志军. 焊接技术在航空航天工业中的应用和发展建议. 航空制造技术, 2008, 26(16):26-31.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第一卷)焊接方法及设备. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [4] 齐向前, 李玉昌, 武建军, 等. 铝合金激光焊接技术特性. 焊接技术, 2005, 34(3): 30-32.
- [5] 宋东福, 王海艳, 戚文军, 等. 铝合金搅拌摩擦焊的研究现状与展望. 电焊机, 2011, 41(3):50-54.

(责编 深蓝)