

先进焊接技术在航空制造中的应用

Application of Advanced Welding Technique in the Aviation Industry

北京航空制造工程研究所 李晓红



李晓红

1998年硕士毕业于北京航空航天大学制造工程系焊接专业,现为北京航空制造工程研究所发动机工艺研究室主任,高级工程师。长期从事特种焊接工艺技术研究和型号攻关工作,获国防科技进步奖2项,部级科技进步奖3项,发明专利3项,发表论文10余篇。

随着航空武器装备性能要求的不断提高,越来越多地采用了新材料、新结构。这些新材料和新结构的出现提升了产品的性能,但同时包括焊接技术在内的航空制造技术提出了更高的要求。近年来,活性焊剂焊接技术、新型钎焊和扩散焊技术、搅拌摩擦焊技术、线性摩擦焊技术、高能束流焊接技术以及焊接应力变形控制技术等先进的焊接技术在航空制造领域取得了一系列的发展和

焊接技术具有可以明显减轻结构重量、降低制造成本、提高结构性能等特点,同时焊接技术自身也在技术领域的范畴内不断地创新与发展,开发出的新型工艺技术为先进航空结构设计和制造提供了技术支撑。随着航空武器装备及其动力装置对轻质化、长寿命、低成本、高可靠制造的需求,先进焊接技术将起到越来越重要的作用。

应用,北京航空制造工程研究所在这些技术的研究方面开展了卓有成效的工作。

活性焊剂焊接技术

活性焊剂焊接技术是近年来国内外研究比较多的一种新技术,该技术目前主要应用于TIG焊接工艺过程,即A-TIG焊。A-TIG焊接过程中最明显的特点是电弧收缩、熔深增加。与常规TIG焊相比,A-TIG焊主要的工艺优势还包括:降低焊接热输入量,改善焊缝成形效果,提高焊接效率。

近年来,北京航空制造工程研究所、哈尔滨工业大学和甘肃工业大学等科研机构和院校在低碳钢、不锈钢、钛合金、铝合金和镁合金等材料的活性焊剂配方研制、焊接机理和工程化应用研究等方面开展了卓有成效的工作。低碳钢和不锈钢活性焊剂产品已经在高压锅炉管路、石油管

道等产品上获得应用。由北京航空制造工程研究所开发的 不锈钢活性焊剂已在高速列车轨道焊接上实现大批量应用,而由其研制开发的钛合金活性焊剂系列成熟产品可以一次性焊接最大厚度达6mm的钛合金板材,可代替常规TIG焊中开坡口多道焊的工艺,使工作效率大大提高。采用该系列焊剂焊接相同规格的钛合金薄板时,焊接热输入量可以减少60%以上,而且焊接气孔发生率显著降低,这对于提高钛合金焊缝质量、降低焊接应力和变形具有积极效果。目前该系列产品已经用于复杂航空结构件研制和生产中,如波纹梁、腹鳍等,此外在航天储箱、高压钛球等钛合金产品中也获得了应用,目前正在推广应用于其他钛合金焊接产品研制和生产中。

由于活性焊剂焊接技术具有改善焊缝成形效果的优点,国内外科技工作者正在尝试将该技术应用于等

离子焊、激光焊和电子束焊接工艺中,以解决这些焊接方法焊缝成形差的问题,并取得了一定效果^[1-5]。在耐热高温合金、铝合金和镁合金等新材料的活性焊剂配方研制、活性焊剂药芯焊丝研制以及焊接机理的研究方面获得了初步的成果^[6-10],但要实现工程应用仍需要开展更深入的研究工作。

新型钎焊与过渡液相扩散焊(TLP)技术

近年来,耐热高温合金、镍铝基金属间化合物和钛铝基金属化合物等新的高性能材料在航空发动机制造中获得了应用。为了获得与母材相匹配的高性能接头,目前最为有效的连接方法为过渡液相扩散焊(TLP)方法。此外,在接头强度要求较低时,也可采用钎焊方法。如美国底特律内燃机厂制造的双性能涡轮盘,其叶片环件为整体铸造的MAR-M-246合金,盘体为PA-101粉末合金,采用钎焊封接后再用热等静压扩散处理的方法制成整体构件。GE公司开展了NiAl单晶合金对开叶片研制工作,用类似于TLP焊的活性钎焊连接工艺将NiAl单晶叶片连接在一起,所获得的接头性能与NiAl单晶相当。P&W公司采用TLP扩散焊工艺对第一代单晶合金PWA1480进行了焊接,焊接接头982℃的持久强度和等温低周疲劳性能与母材相比基本相当,焊接的叶片已用于F100发动机及其他新型发动机。NASA兰勒研究中心采用共晶钎焊方法制造了面板为Ti₃Al合金Ti-14Al-21Nb、芯板为普通钛合金Ti-3Al-2.5V的Ti₃Al基金属蜂窝结构,连接时在芯板表面电镀一层Cu,然后与面板装配在一起进行扩散焊^[11]。

国内的相关研究机构采用钎焊和TLP技术进行了航空发动机新型材料的连接试验研究,并取得了一定

的成果^[12-16]。北京航空制造工程研究所采用自行研制的镍基中间层合金KNi9实现了氧化物弥散强化高温合金MGH956材料的有效连接,高温抗拉强度达到基体的80%。并在此基础上进行了MGH956材料的多孔层板结构新型冷却结构的研制。此外,还进行了Ni₃Al合金的扩散焊接试验研究,接头的持久强度达到基体的80%以上,在涡轮导向叶片制造中获得了应用。

随着一些陶瓷类材料连接强度要求的提高,近几年出现了一种新的扩散焊方法——放电等离子扩散焊。其工作原理是利用直流脉冲电流产生放电等离子,在放电冲击压力、焦耳热和电场作用下实现快速扩散连接。适用于陶瓷、CMC、粉末合金等常规方法难焊材料及其异种材料的连接,在航空、航天耐高温材料及其构件连接中有广泛的应用前景。

未来在航空材料的钎焊和扩散焊连接方面,研究方向将主要集中在新一代的镍铝基金属化合物、钛铝基金属间化合物和镍基单晶高温合金以及粉末合金、陶瓷和复合材料等难焊材料和结构的连接。

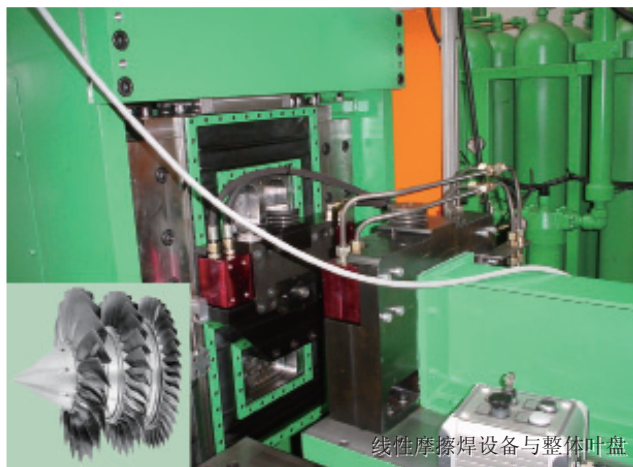
线性摩擦焊接(LFW)技术

线性摩擦焊技术(Linear Friction Welding, LFW)是针对叶盘结构的制造、修理发展起来的一种先进摩擦焊技术,是第四代航空发动机研制中的整体叶盘的叶片与轮盘关键连接技术。国外的研究结果表明,钛合金整体叶盘采用线性摩擦焊要比从实体毛坯加工更加经济,而且可将制造周期减至最短,有工艺简

单、成本低、综合性能高的特点,因此有着广阔的应用前景。

线性摩擦焊接过程为:在焊接压力作用下,其中一个焊件相对于另一个焊件沿直线方向以一定的振幅和频率作直线往复运动,利用摩擦生热加热待焊接部位的表面,当摩擦表面达到粘塑性状态时,迅速停止摩擦运动,并施加顶锻力,完成焊接。

R·R和MTU公司从2000年开始采用线性摩擦焊加工EJ200的1~3级风扇盘。PW公司采用线性摩擦焊焊接F119的带有空心叶片的1级风扇叶盘以及风扇2、3级,压气机1、2级的叶盘以及风扇2、3级,线性摩擦焊还用于F120的1级风扇叶盘、JSF升力风扇叶盘和JSF119的风扇叶盘的焊接^[19]。



线性摩擦焊设备与整体叶盘

国内北京航空制造工程研究所已经将线性摩擦焊技术应用于低碳钢、高温合金和钛合金的有效连接,但仍需要深入的试验研究工作。

搅拌摩擦焊(FSW)技术

搅拌摩擦焊技术(Friction Stir Welding, FSW)是由英国焊接研究所发明的一项新型固相连接技术。搅拌摩擦焊技术与熔焊技术相比具有如下优势:

(1)焊缝为细小的锻造组织,具有良好的机械性能;

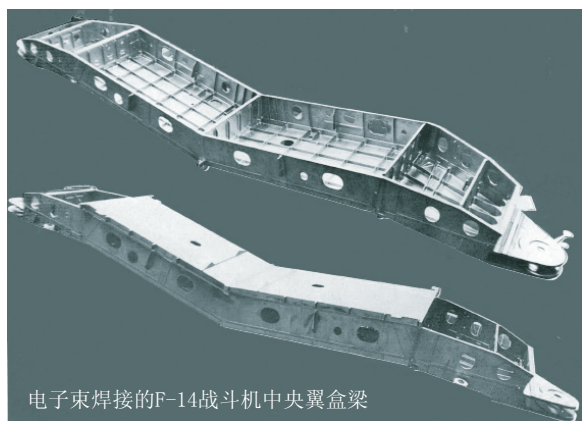
(2)与其他焊接方法相比,焊接变形小,能够进行全位置的焊接,适

应性好,效率高,操作简单;

(3) 焊前及焊后处理简单,而且焊接过程中不需要焊条、焊料等;

(4) 可以焊接铝、镁、铜、钛、钢等合金以及异种材料。

近 10 年间搅拌摩擦焊技术得到了飞速发展,目前已经可以焊接所有牌号的铝合金材料和多种焊接结构形式,其中包括对接、搭接、角接等。其应用范围已从早期的船舶制造扩



电子束焊接的F-14战斗机中央翼盒梁

展到航空航天和汽车制造等领域。在航空制造领域,搅拌摩擦焊技术有着广泛的应用前景。研究表明,将搅拌摩擦焊应用于飞机制造中,可以代替高达 70% 的铆钉连接方式,有助于减轻结构重量,提高生产效率和降低生产成本。美国的 Eclipse 飞机公司已将搅拌摩擦焊技术应用于 500 型商务飞机的机舱、后机身、机翼以及发动机固定件的制造,并因此大幅降低制造成本。波音公司成功地对 C-130 型大型军用运输机的载货地板进行了搅拌摩擦焊的应用开发研究,利用搅拌摩擦焊代替紧固件连接,简化了地板结构设计并提高了构件的生产效率^[17]。

国内,北京航空制造工程研究所和英国焊接研究所合作成立了中国搅拌摩擦焊中心,加速了搅拌摩擦焊技术在中国的发展、推广和应用。截至目前,在技术、工艺和设备等方面都获得

了突破性的进展,并且在工业生产中得到应用^[18]。目前搅拌摩擦焊技术的成熟应用还局限于铝、镁和铜合金等,今后将大力开展钢、高温合金和钛合金等材料的应用研究。

高能束流焊接技术

高能束流(High Energy Density Beam)焊接技术是利用功率密度大于 $5 \times 10^8 \text{W/cm}^2$ 的热源(如电子束、激光和等离子体)对材料或结构进行连接的技术。高能束流技术被誉为“21 世纪的加工技术”,具有深穿透、精密控制、微焦点、高能密度、高速加热以及全方位加工的技术特点。高能束流焊接技术焊接深度大,焊缝性能好,焊

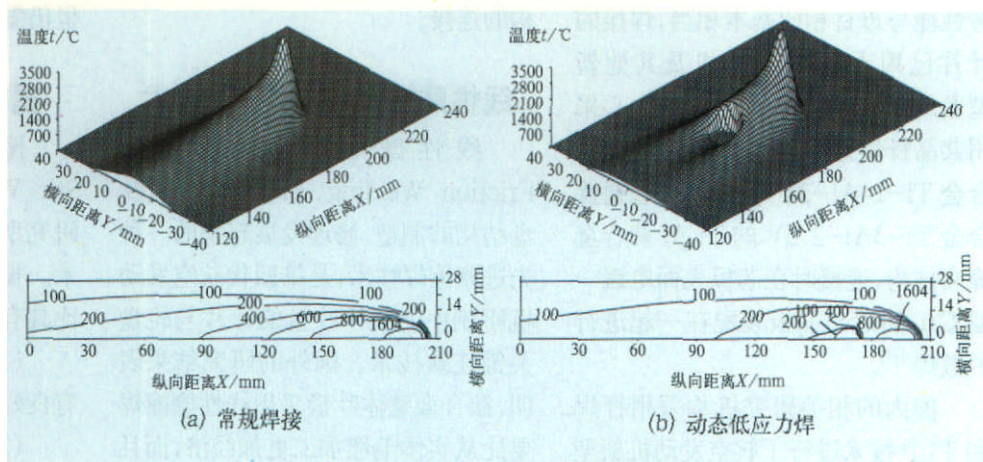
接变形小,焊接精度高,并具有较高的生产效率。电子束焊接和激光焊接是目前航空制造领域应用较为普遍的技术。

电子束焊接可以获得高质量、低变形、大深宽比的焊缝,而且可以实现变截面焊接,因此在飞机和发动机的制造中应用范围最广,如美国的 F22 新型战斗机、欧洲 2000 型战斗机机身的部分承力结构以及欧洲四国合作研制的 EJ200 发动机第 3 级风扇钛合金整体叶盘等。国内的航

空企业也相继购入了先进的电子束焊接设备,并且应用到飞机机体以及发动机关键零件的焊接生产,解决了由于国内现有锻造能力不足不能生产大尺寸构件的难题。北京航空制造工程研究所在电子束焊接设备开发、焊接工艺研究等方面一直处于领先地位,开发了大厚度电子束焊接工艺,并应用到飞机框梁和起落架等产品的研制过程中。

激光焊接具有焊接能量密度高、速度快、变形小、焊缝深宽比大、焊缝质量高、可达性好(激光在孔洞中多次反射,孔细而深)等优点。与电子束焊接相比,除有相同的焊接接头特性外,激光焊接无需真空室,工艺可达性好,生产效率高,操作控制灵活。而且,结合机械手,还可实现空间三维焊接及自动化柔性焊接。在飞机机体的制造中,广泛采用激光焊接代替铆接结构,可以减轻结构重量,提高结构质量,如 A330/340 飞机壁板的蒙皮与筋条的连接就采用双束激光填丝焊接技术,不仅可以节省材料,降低成本,而且大大减轻了飞机的结构重量。激光焊接应用于航空发动机机匣、外套、支座等关键零件的制造。

国内在激光焊接研究方面起步也较早,但多集中在汽车制造领域。北京航空制造工程研究所针对激光焊接技术应用于航空零件的焊接开展了大量的研究工作,包括壁板结构



动态低应力焊接与常规焊接温度场分布特点

的激光焊接工艺研究、激光电弧复合焊接工艺研究等,研究成果已在飞机壁板的研制中获得应用^[20-24]。

薄壁构件焊接应力和变形控制技术

飞机和发动机薄壁构件焊接变形问题长期以来一直是困扰航空制造业的主要难题之一。针对薄壁构件的焊接应力和变形控制也是国内外重要的研究领域之一。北京航空制造工程研究所长期从事焊接变形控制工艺研究工作,开发了包括预变形技术、焊后滚压技术、静态低应力无变形技术和动态低应力焊接技术等。这些技术可以有效减少和消除焊接产生的应力和变形,已经在航空、航天型号的研制和生产中获得了应用^[22-27]。

北京航空制造工程研究所开发的动态低应力焊接技术通过采用随焊“急冷”的方式控制焊接温度场分布,从而实现了焊接应力的主动控制,使焊缝中心残余应力由拉应力变为压应力,残余拉应力峰值降低到常规焊接应力峰值的50%左右,焊缝两侧的压应力降到极低水平^[25-27]。在这种应力水平下,焊接构件将不再发生失稳变形。该技术的工艺可实施性好,可以应用到复杂结构的焊接过程,有着非常好的应用前景。未来的研究将包括动态低应力焊接技术的冷源开发和工程应用,以及如何用于激光焊和搅拌摩擦焊等焊接过程。

结束语

作为航空制造工程主要工艺方法之一的先进焊接技术,在航空工业发展的推动下获得了长足的进步与发展。一方面,航空飞行器及其动力装置新型号的研制与生产对先进焊接技术的发展提出了需求牵引,毕竟在解决众多制造难题时,焊接技术具有可以明显减轻结构重量、降低制造

成本、提高结构性能等优点,同时焊接技术自身也在技术领域的范畴内不断地创新与发展,开发出的新型工艺技术为先进航空结构设计和制造提供了技术支撑。随着航空武器装备及其动力装置对轻质化、长寿命、低成本、高可靠制造的需求,先进焊接技术将起到越来越重要的作用。但就我国现有的技术水平和技术装备而言,要缩短与国外先进水平的差距并满足我国航空新型号研制对焊接技术的需求,还需要焊接技术工作者们付出不懈的努力。

参考文献

- [1] Lucas W, Howse D. Activating flux increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes. *Welding & Metal Fabrication*, 1996, 64(1):11-17.
- [2] Paskell T, Lundin C, Castner H. GTAW flux increases weld joints penetration. *Welding Journal*, 1997, 76(4): 57-62.
- [3] Pantan B E, Zamkov V N, Prilutsky V P, et al. Contraction of the welding arc caused by the flux in tungsten-electrode argon-arc welding. *Paton Welding Journal*, 2000(1):5-11.
- [4] Pantan B E, Yushchenko K A, Kovalenko D V, et al. Role of keyhole in formation of deep penetration in A-TIG welding of stainless steel. *Paton Welding Journal*, 2006(6):2-6.
- [5] 孙亚非, 史春元. 活性剂等离子弧焊接电弧现象的试验研究. *航空制造技术*, 2006(10):76-81.
- [6] 赵勇, 严铿. 不锈钢 A-TIG 焊活性剂对焊缝成形的影响. *焊接技术*, 2004, 33(4):24-25.
- [7] 李晓红, 张连锋. 活性焊剂对钛合金氩弧焊焊接接头性能的影响. *航空航天焊接国际论坛论文集*. 北京:机械工业出版社, 2004: 184-191.
- [8] 黄勇, 樊丁. 活性剂对镁合金交流 A-TIG 焊的影响. *焊接学报*, 2007, 6(6): 41-44.
- [9] 刘黎明, 蔡东红. 镁合金活性焊丝 TIG 焊. *焊接学报*, 2007, 4(4):29-37.
- [10] 樊丁, 樊清华. 活性剂对铝合金电子束焊的影响. *兰州理工大学学报*, 2005, 6(12):5-8.

[11] 李晓红, 毛唯. 钎焊与扩散焊在航空制造业中的应用. *航空制造技术*, 2004(11):28-32.

[12] 刘纪德, 金涛. TLP 连接对一种镍基单晶高温合金拉伸性能的影响. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(2):332-334.

[13] 李晓红, 毛唯. Ni3Al 基高温合金 TLP 扩散焊接头组织与性能研究. *中国材料研讨会论文集*, 北京, 1996.

[14] 张蕾, 侯金保. K640 合金过渡液相扩散焊接工艺优化. *航空航天焊接国际论坛论文集*. 北京:机械工业出版社, 2004: 184-191.

[15] 董宝明, 侯金保. Ni₃Al 基金属间化合物 TLP 连接技术研究. *第十次全国焊接会议论文集*, 天津, 2001:258-261.

[16] 谭成文, 李珊珊. 镁/铝层状复合材料的扩散连接制备及界面特征. *特种铸造及有色金属*, 2007, 27(1):1-4.

[17] 栾国红, 柴鹏. 飞机制造前景技术—搅拌摩擦焊. *航空航天焊接国际论坛论文集*. 北京:机械工业出版社, 2004:277-287.

[18] 栾国红. 搅拌摩擦焊在中国的发展. *电焊机*, 2004: s98-s106.

[19] 张田仓, 韦依. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用. *航空制造技术*, 2004(11):56-58.

[20] 关桥, 刘方军. 高能束流焊接技术的应用与发展趋势. *第九次全国焊接会议论文集*, 天津, 1999:18-29.

[21] 刘方军. 高能束流加工技术在航空构件上的应用. *航空航天焊接国际论坛论文集*. 北京:机械工业出版社, 2004:257-261.

[22] Guan Qiao. A survey of development in welding stress and distortion controlling in aerospace manufacturing engineering in China. *Welding in the World*, 1999, 43(1):64-74.

[23] 关桥, 李菊. 热拉伸效应控制飞行器板壳结构焊接变形. *航空制造技术*, 2007(9):30-34.

[24] 关桥, 郭德伦, 李从卿, 等. 薄壁板件低应力无变形焊接方法及装置. *中国专利*. 87100959.5, 1987-02-28.

[25] 关桥, 张崇显. 动态控制薄壁板件低应力无变形焊接方法及装置. *中国专利*. 93101690.8, 1993-02-25.

[26] 李菊, 关桥. 钛合金薄板带热沉钨极氩弧焊的应变场. *材料工程*, 2004(3):11-14.

[27] 李菊, 关桥. 钛合金薄板带热沉的 TIG 焊温度场. *焊接学报*, 2003, 24(1):69-72.

(责编 晓霏)