

飞机钛合金整体结构的超塑成形/焊接 组合工艺技术

北京航空制造工程研究所(100024) 郭和平 曾元松 韩秀全 李志强

摘要 30多年的研究应用表明,超塑成形/焊接整体结构在降低飞机结构重量、提高结构完整性和承载效率方面具有独特的技术优势,对现代飞机结构设计和制造产生了深远的影响。文内详细阐述了超塑成形整体结构特点及工艺过程,综述了近年来钛合金超塑成形整体结构制造技术在航空领域的发展应用现状,并介绍了中国超塑成形整体结构的研制和应用进展情况。最后指出,新材料、新结构的超塑成形/焊接组合工艺在未来新型飞机和航天飞行器上的应用前景广阔,激光焊与超塑成形的新型组合工艺将会成为重要的超塑整体结构制造技术。

关键词: 钛合金 超塑成形 焊接 整体结构

中图分类号: TG457

0 前言

钛合金超塑成形(SPF)及超塑成形/扩散连接(SPF/DB)整体结构具有成形性好、设计自由度大、成形精确、没有回弹、无残余应力、零件数量少等优点,成为航空航天工业的一项关键制造技术^[1]。

20世纪60年代,由于国外超音速巡航飞机计划的推动,需要采用结构温度更高的钛合金材料,而用传统方法制造钛合金结构件的成本过高,飞机制造中钛合金结构用量的增加和开发低成本钛合金构件成为了SPF/DB技术开发和研究的最初原动力。当时承担“协和”、B-1飞机研制和生产的主要飞机制造公司(美国的洛克威尔公司,英国航宇公司BAE等),为超塑成形技术在飞机结构上的应用进行了开创性的研发工作。

20世纪70年代早期,在洛克威尔、麦道(后被波音合并)、格鲁曼、波音四大航空制造公司参加的BLATS计划中,钛合金的SPF、SPF/DB技术被列为重点研究项目,得到了超前的研究和应用。在该计划中,F-15战斗机后机身的整个壳体(整体框、梁、壁板等)和B-1B大型轰炸机的舱门壁板及其他构件均采用了超塑成形和超塑成形/扩散连接组合工艺,其中HiMAT验证机SPF、SPF/DB中央翼盒,以四倍的使用寿命通过了试验。随后,这四家公司率先在飞机零部件制造中采用超塑成形、超塑成形/扩散连接技术,产生了大量的

专利技术^[2]。

此后,由英国国防部投资的“战斗机验证计划”(EAP)中,BAE公司完成了先进SPF/DB结构制造和试验的研究项目,为EAP验证机提供了龙骨组件等多个部件。法国“阵风验证机计划”中也设计制造了SPF/DB钛合金机翼前缘,并通过了飞行试验。

欧美等国的大型国防研究计划对于SPF、SPF/DB工艺技术的发展起到了至关重要的作用,目前利用SPF、SPF/DB技术已经生产出了舱门、维修口盖、襟翼、隔板等多种飞机结构件,并广泛应用于F-14、F-15、T-38教练机、B-1B轰炸机等多种型号军用飞机和波音、空客的民用飞机上。

超塑成形(SPF)及超塑成形/扩散连接组合工艺(SPF/DB)技术的出现,大大改善了钛合金难以加工成形的状况,而且还可以制造复杂外形曲面、内筋加强的多层空心结构,在降低结构重量、提高结构完整性和承载效率方面具有独特的技术优点^[3]。在经过30多年的开发研究和验证试验,SPF和SPF/DB技术已经成为一种推动现代航空航天结构设计概念发展和突破传统钣金成形方法的先进制造技术,欧、美等许多发达国家已将超塑成形及其相关工艺技术列为国防关键技术。实践证明,超塑性钛合金具有优异的超塑性变形能力,这些特点不仅使钛合金的超塑成形技术在飞机、导弹、发动机等航空航天重要零部件结构中获得了广泛的应用,而且钛合金超塑成形整体结构在舰艇装备上的应用也开始引起了高度重视。

1 超塑成形整体结构特点和技术优势

表 1 列出了目前在工业领域已获应用的部分钛合金超塑性材料及其超塑性数据。其中,Ti-6Al-4V 合

金由于其超塑成形温度(790~940℃)和扩散连接温度(900~940℃)具有良好的兼容性,其 SPF/DB 组合工艺有着得天独厚的技术优势,目前大多数钛合金超塑整体结构采用的就是细晶 Ti-6Al-4V 合金板材。

表 1 常用钛合金超塑性材料

合金牌号	成分(质量分数,%)	超塑温度 $T/^\circ\text{C}$	断后伸长率 $A(\%)$	m 值
Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	790~940	1 590	0.6~0.8
Ti-6242	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	880~970	900	0.5~0.7
IMI 834	Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.5Mo-0.3Si-0.05C	950~990	400	0.35~0.65
Ti55	Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	810~930	1 600	0.48~0.65
SP 700	Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo	750~830	700	0.5~0.55

目前,采用超塑成形整体结构的基本形式有图 1 所示的 4 种,即单板式加强结构(图 1a)、两层板式整体加强结构(图 1b)、三层板夹层结构(图 1c)和四层板的夹层结构(图 1d)。每种基本结构形式都可经过适当的改进,以满足特殊零件制造的要求。

中,内层芯板先根据构件加强要求的型式进行封边焊接,然后面板和芯板沿周边扩散连接并气压成形,最后在超塑成形温度和压力下,完成芯板之间和芯板与面板之间的扩散连接。整个过程只需一个成形模,不需要中间退火或其他热处理,大量减少工装和零件制造与装配工作量,同时达到明显减重、降低制造成本的目的。

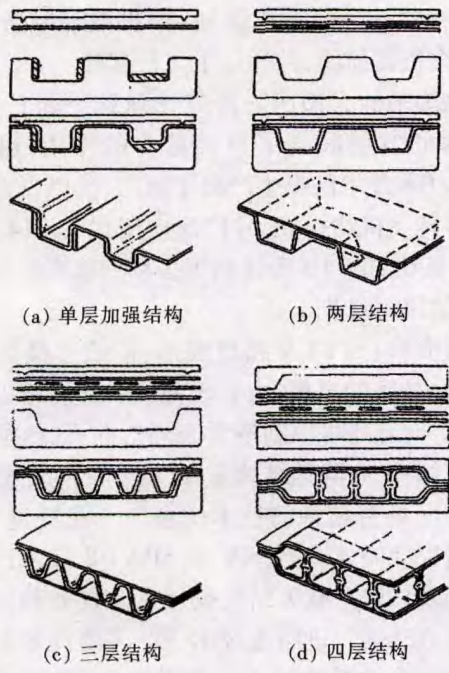


图 1 超塑成形整体结构的四种基本形式

超塑成形整体构件的空心结构形式和尺寸可由其芯板涂覆的止焊剂图案而定,图 2 给出了典型三层和四层超塑成形整体结构工艺过程示意。在制造过程

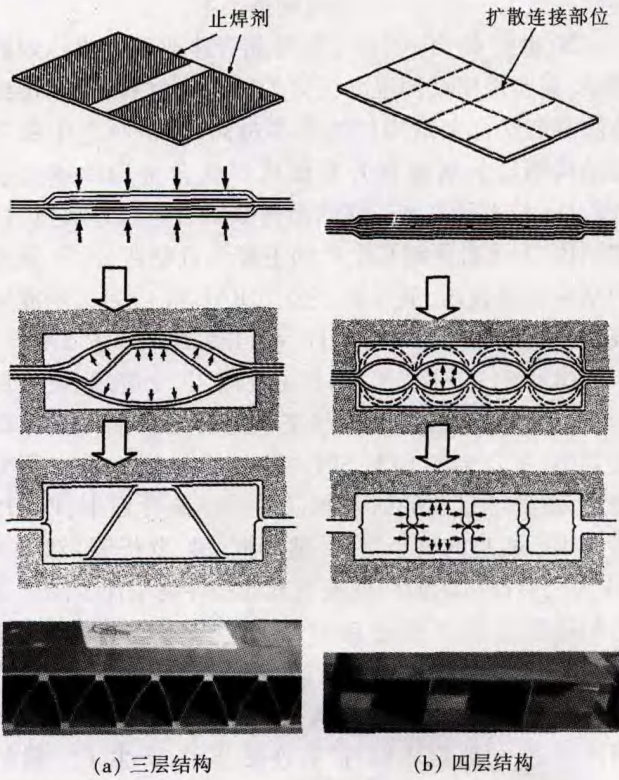


图 2 典型三层和四层超塑成形整体结构工艺过程

可以说,超塑成形整体结构为设计人员提供了更大的自由度,可以据此设计出更为合理、更加先进的新型结构,从而提高结构承载效率、减轻结构件重量。飞机发动机检修舱门基本结构是由纵向桁条、横向框架和蒙皮组成,如图 3a 所示。传统的制造工艺是单件热成形——铆接,16 个零件由 500 个铆钉铆接而成,这种工艺最突出的问题是成型模具多,模具制造和零件加工周期长,管理协调工作量大。而采用超塑成形/扩散连接组合工艺后,如图 3b 所示,零件数量、加工工序大大减少,模具、装配夹具、管理协调费用成本显著降低,同时还减少了密封剂的使用,使得生产效率得到了极大提高,技术经济效益十分显著。

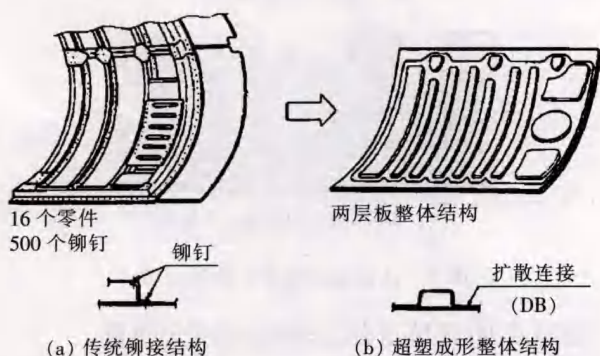


图 3 钛合金舱门壁板传统铆接结构和整体结构对比

由上可知,对于现代飞机结构设计生产而言,超塑成形/焊接组合工艺技术具有如下特点和优势:

- (1) 节省工艺装备,缩短飞机制造周期;
- (2) 改善结构性能,延长飞机机体寿命;
- (3) 改变传统结构设计概念,提高结构完整性;
- (4) 降低制造成本,减轻重量。

2 超塑成形整体结构的应用与发展

进入 21 世纪,随着国际航空工业的迅猛发展,竞争越来越激烈,在原有基础研究和工程应用经验的基础上,国外主要航空制造公司开始在 SPF、SPF/DB 组合技术方面继续不断改进,在新结构、新材料以及采用先进焊接技术方面开展研究,不断扩大该项技术在航空领域的应用。由于 SPF、SPF/DB 结构的零件数量少,与铆接结构和螺接结构相比,消除了紧固孔引起的裂纹源,从而使其结构耐久性和损伤容限有了大幅度的提高和改善。因此,超塑成形整体结构在长寿命要求的民用飞机上也引起了世界各大飞机制造商的高度关注。

在民用飞机结构零部件制造方面,超塑成形工艺技术已显示出非常巨大的应用潜力,飞机结构重量 8%~10% 以上的结构可以采用超塑成形的整体结构。这些应用包括:稳定性设计结构(肋、梁、框架、承压支柱),复杂的多板式部件(壁板,固定托架和支撑架),复杂壳体(管道,箱体,容器),气动面,检修口盖/舱门,发动机舱部件,发动机转子零件,热空气管道,以及装饰壁板和生活设施等等。1983 年英国宇航公司生产的 BAe. 125-800 行政机上应急舱门最先采用了超塑成形整体结构(图 4),该舱门采用了钛合金的 SPF/DB 结构,与原先的铝合金铆接结构相比,成本降低了 30%,零件数量从 76 件减少为 14 件,紧固件从 1 000 个减少为 90 个,该结构通过了 120 000 个压力循环的疲劳试验,取得了明显的技术经济效益。

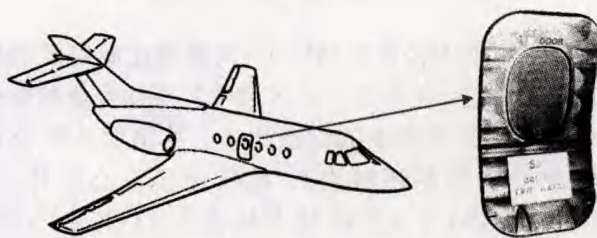


图 4 BAe. 125-800 行政机上的 SPF/DB 应急舱门

欧洲空中客车公司的 A310、A320、A330/40 制造中,采用超塑成形/扩散连接的钛合金两层超塑整体结构替代铝合金铆接结构后,如图 5 所示,取得了减重 46% 的效果。此外,A310 飞机前缘缝翼收放机构的钛合金 SPF/DB 外罩,与 A300 冷成形后焊接的钛合金外罩相比,重量减轻了 30%。A330 和 A340 飞机的检修口盖、尾翼缝翼传动机构外罩以及驾驶舱顶盖均为 SPF/DB 结构件。此外,A380 大型客机发动机吊舱舱门结构也采用了超塑成形/扩散连接组合工艺。

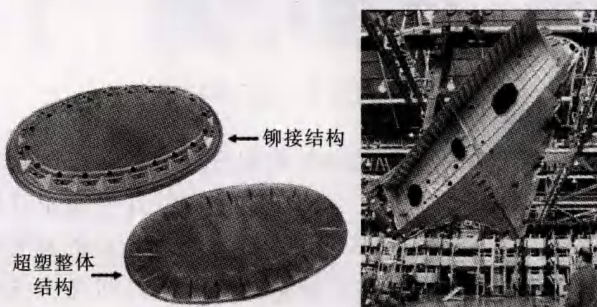


图 5 A310/A320 飞机的机翼检修口盖

波音 777 发动机气动舱门也将采用 Ti6Al4V 的两层超塑整体结构(图 6),用以替代原来的 Inconel 625 高温合金焊接结构。每架飞机上有 8 个气动舱门,原来结构 23 个零件需要 70 h 的装配时间,采用钛合金超塑两层整体结构后减少到 2 个零件,装配时间仅需 6 h,同时减重 1.4 kg。



图 6 波音 777 发动机上的气动舱门

在航空航天轻量化结构中,大涵道比涡扇发动机的关键部件之一的宽弦空心风扇叶片是钛合金超塑成形整体结构工艺技术的杰出代表。英国罗·罗公司 1984 年开始研制超塑成形/扩散连接空心叶片,于 1995 年和 1996 年先后将 26 片钛合金空心宽弦无凸肩风扇叶片应用到遛达 700 和遛达 800 发动机上。最近,空客 A380 飞机使用的遛达 900 发动机如图 7 所示,其一级风扇直径为 295 cm(116 inch),整个风扇部件包括 24 片采用新的弯掠设计方法设计的空心钛合金风扇叶片,大大改善了叶片的气动特性,在抗外来物损伤方面比早期的风扇叶片效率更高。

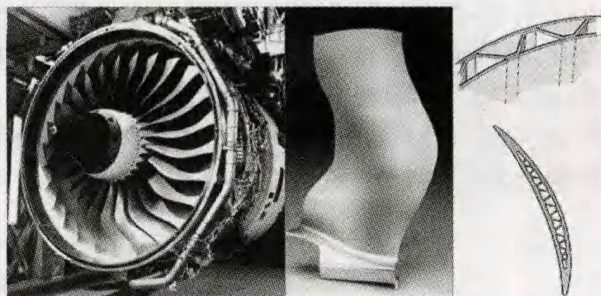
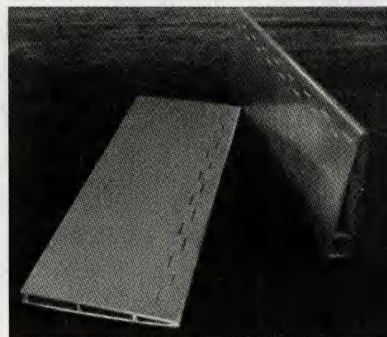


图 7 钛合金宽心空心风扇叶片

中国的超塑成形整体结构制造技术研究开始于 20 世纪 70 年代,北京航空制造工程研究所作为最早开展超塑成形技术研究的单位之一,经过近 40 年的发展取得了长足的进展,开发的发动机整流叶片和飞机气动面、口盖等飞机钛合金零部件生产制造已形成体系(图 8),达到了小批生产规模。在此基础上,积极开展了钛

合金宽弦空心风扇叶片、防火墙、大型壁板等超塑整体结构件的研制,将钛合金超塑成形整体结构的应用水平推上了一个新的高度。



(a) 发动机空心整流叶片



(b) 飞机气动面四层钛合金结构

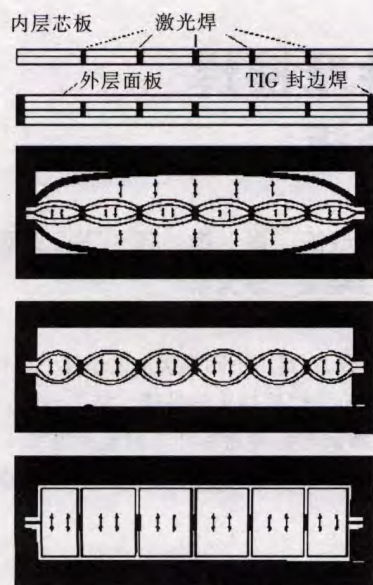
图 8 钛合金超塑成形整体结构

3 超塑成形/焊接组合工艺技术的最新进展

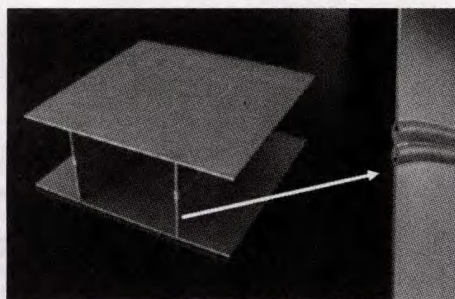
近年来,钛合金超塑成形/激光焊的组合工艺,由于能够大大缩短常规 SPF/DB 零件的制造周期,提高零件生产的成品率,引起了航空制造部门的极大关注。如图 9 所示,北京航空制造工程研究所采用激光焊替代内层芯板扩散连接^[4],在国内率先开展了钛合金超塑成形/激光焊的多层结构研制工作。

波音公司和华盛顿州立大学联合开发了“SPL”(Superplastic Forming & Laser Welding)工艺^[5],采用了超塑成形和激光焊接的组合工艺,开展了钛合金、不锈钢等材料的多层结构研制,在一个工艺过程中完成多层加强结构的制造,从而构件研制中减少零件和连接件数量。研究表明,采用这种新工艺,通过激光焊可以得到隔墙结构、正弦波形和椭圆形格子等芯板图案,并在构件研制中能够大大提高生产效率、降低成本。

此外,超塑成形/钎焊、超塑成形/热等静压组合新工艺在整体结构研制方面得到了研究人员的高度重视,这些工艺可以帮助解决扩散连接难度较大的材料(如高温钛合金、钛铝间金属化合物等)的结构制造问题。对于超塑成形温度和扩散连接温度差异较大的钛合金材料(如 Ti-15-3 钛合金等),超塑成形/钎焊(点焊)成为其整体结构制造的技术途径。



(a) 四层结构制造原理图



(b) 试验件

图9 超塑成形/激光焊组合工艺技术

度大、成形精度高、无回弹等独特的技术特点,同传统制造工艺相比,超塑成形/焊接组合工艺正逐步显示出其独有的技术优势。超塑成形/焊接组合工艺在减轻飞机结构重量、提高飞行性能等方面技术经济效益显著,已成为飞机结构制造的重要支撑技术。随着国际航空工业的发展,新材料、新结构的超塑成形/焊接组合工艺在长寿命飞机结构制造方面引起了世界各大飞机制造商的高度关注,其中超塑成形/激光焊等新型组合工艺经过全面系统的工程化研究,必将进一步推动超塑成形整体结构的工业应用。

参 考 文 献

- [1] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering, 1996, A213:103-114.
- [2] Stacher G W, Weisert E D. Concurrent superplastic forming/bonding of B-1 components[M]. Los Angeles, USA, 1979.
- [3] Li Zhiqiang, Guo Heping. Application of superplastic forming and diffusion bonding in the aerospace industry[J]. Materials Science Forum, 2005, 475-479:3037-3042.
- [4] Li Z Q, Li X H. The applications of SPF/DB combined with welding technologies[J]. Materials Science Forum, 2007, 551-552:49-54.
- [5] Alan Jocelyn, Aravinda Kar. Use of laser(s) in the process of superplastic forming and diffusion bonding[J]. Materials Science Forum, 2004, 447-448:533-539.

4 结束语

超塑成形/焊接整体结构具有成形性好、设计自由

作者简介: 郭和平, 1973 年出生, 博士, 高级工程师。主要从事新材料, 新结构的超塑成形/焊接技术研究工作。

哈尔滨市香坊区南典焊接研究所

应急电焊条

针对高碳、高强、高拘束、大厚件裂纹敏感性大, 焊修工艺复杂, 成本较高的现状, 我所采用自主开发的焊缝净化、焊态收缩率匹配及合金调整等多项非传统技术, 研制了多个系列抗裂型堆焊电焊条, 为该领域开创了一条简便快速, 低成本的捷径。

适用范围: 各种铸钢轧辊, 轴类, 机体等大型铸钢件局部修复。

焊条特点: 工艺条件要求低, 特别适合无法高温预热等极端条件的无裂修复。焊缝硬度 30~60HRC 不同等级。

药芯高合金电焊条

适用于阀门, 冶金, 石化等行业机械设备的表面堆焊, 具有使用温度高, 抗高温氧化, 抗擦伤, 金相组织稳定等特点, 合金加入量可灵活调整, 最大 Cr 量可达 3/8 以上, 具有比铸芯焊条更广泛的应用领域, 主要性能高于钴铬钨焊条, 价格大大低于钴铬钨焊条。焊缝硬度 35~50HRC。

地 址: 哈尔滨市香坊区赣水路 1 号 604 室 邮编: 150090

联系电话: 13091889193(董先生), 13614515415(徐先生) 传真: 0451-82579798