



超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势

Application Progress and Development Tendency of Superplastic Forming/Diffusion Bonding Technology

北京航空制造工程研究所 李志强 郭和平



李志强

1986年毕业于西北工业大学材料加工工程专业。现任北京航空制造工程研究所副所长,自然科学研究员,中航工业科学技术委员会委员。主要研究领域包括超塑成形/扩散连接技术、轻量化结构制造技术、特种钣金成形技术以及金属基复合材料等。获国家科技进步二等奖1项,国防科技进步奖6项,发表论文60余篇,专利13项。

超塑成形/扩散连接(SPF/DB)轻量化整体结构改变了传统飞行器结构件的制造模式,使复杂薄壁零件整体化,在降低飞行器结构重量、提高结构完整性和承载效率等方面具有独特的技术优势。

超塑成形/扩散连接(Superplastic Forming/Diffusion Bonding, SPF/DB)技术可以使复杂薄壁零件整体化,在降低飞行器结构重量、提高结构完整性和承载效率方面具有独特的技术优势。本文综述了SPF/DB轻量化整体结构的发展应用现状,并介绍了SPF/DB技术的未来发展趋势。

超塑成形及超塑成形/扩散连接的整体结构具有成形性好、设计自由度大、成形精确、无残余应力、零件数量少等优点,在减轻飞行器结构重量、降低生产成本方面显示极大的优

越性,被誉为现代航空航天工业生产的开创性技术^[1-3]。

SPF/DB 工艺原理与技术特点

超塑成形是利用某些材料在特定条件下具有极好的变形能力这一特性而发展起来的一种成形工艺,采用超塑成形工艺能够制造出常规工艺难以成形的复杂结构,而且没有回弹,能够保证成形零部件的精度,加工重复性好^[4]。扩散连接是利用被连接材料的表面在不足以引起塑性变形的压力和低于被连接工件熔点的温度条件下,使接触面通过原子

间相互固态扩散而形成连接的方法。

对于钛合金而言,材料的超塑成形温度和扩散连接温度接近,可以在一个热循环中完成成形和连接2个工艺过程,从而制造出复杂外形曲面、内筋加强的空心整体构件。与传统铆接结构和螺接结构相比,SPF/DB结构大大减少了零件和工装数量,并有效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。

超塑成形/扩散连接整体构件的基本结构形式都可按照设计要求进行适当改进,以满足特殊零件的制造要求。在典型的三层和四层超塑成形整体结构工艺制造过程中,内层芯板先根据构件加强要求的形式进行封边焊接,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,完成芯板之间以及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,大大减少了工装和零件制造、装配的工作量,同时达到明显减重、降低制造成本的目的。超塑成形整体构件的内部结构形式和尺寸可通过止焊剂图形的调整来改变,从而使得结构设计灵活、自由。

SPF/DB 技术 在国外航空航天领域的应用

从20世纪60年代开始,由于超音速巡航飞机计划的刺激和推动,国外航空工业率先开展超塑成形技术研究。70年代早期,美国洛克威尔公司首先将超塑成形技术应用于飞机结构件制造中,使钛合金制造工艺发生了技术变革。随后,美国的BLATS计划将钛合金SPF、SPF/DB技术列为重点研究项目,在F-15战斗机后机身(整体框、梁、壁板等)和B-1B大型轰炸机的壁板舱门等重要构件研制中大量采用了超塑成形和超塑成形/扩散连接组合工艺。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。

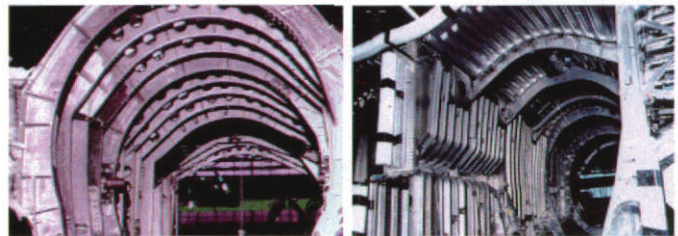
可以说,美、欧等国的大型国防研究计划对于SPF、SPF/DB技术的

发展起到了至关重要的作用,尤其近年来先进武器装备作战性能越来越高,促使钛合金超塑成形整体结构在飞机、发动机、导弹、舰

艇等工业领域的应用不断扩大,显示出旺盛的生命力,在已获得的工程应用领域内产生了巨大的技术经济效益: F-15E后机身结构采用SPF/DB整体结构后,减少了726个零部件(如图1所示),并取消了10000多个紧固件;联合战斗机(JSF)的后缘襟翼和副翼、F-22后机身隔热板等重要结构均采用了钛合金超塑性成形/扩散连接的整体结构。

在民用飞机结构制造方面,据统

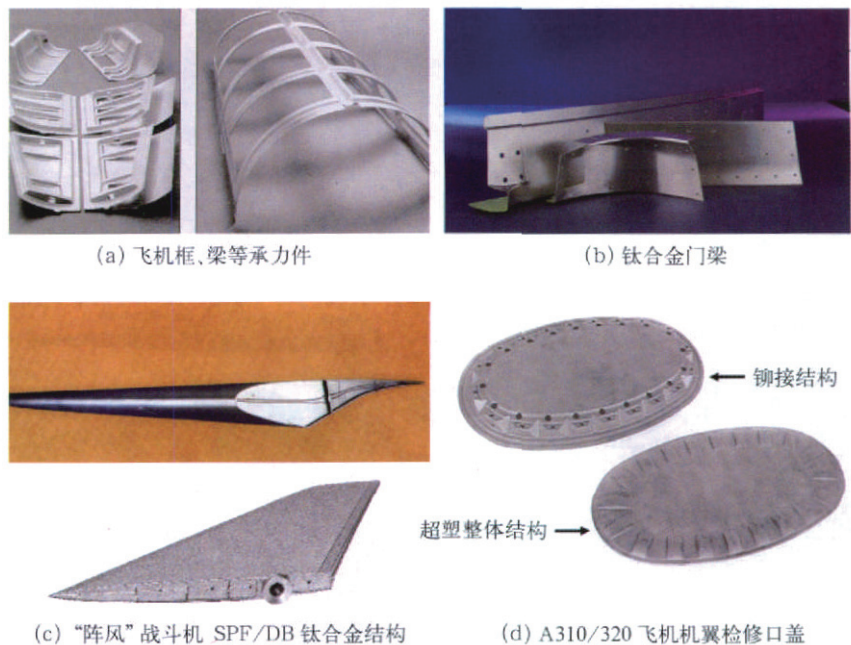
计,飞机结构重量中8%~10%以上的结构可以采用超塑成形整体结构。这些应用包括稳定性设计结构(肋、梁、框架、承压支柱)、复杂的多板式部件(壁板、固定托架和支撑架)、复杂壳体(管道、箱体、容器)气动面、检修口盖/舱门、发动机舱部件、发



(a) 原方案 (b) 采用 SPF/DB 整体结构后

图1 F-15E飞机后机身的SPF/DB整体结构

动机转子零件、热空气管道以及装饰壁板和生活设施等。图2为飞机上采用的部分SPF、SPF/DB结构,欧洲空中客车公司的A310、A320、A330/340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,取得了减重46%的效果;波音777发动机气动舱门采用了Ti6Al4V的两层超塑整体结构,用以替代原来的Inconel625高温合金焊接结构,原来结构23个



(a) 飞机框、梁等承力件

(b) 钛合金门梁

(c) “阵风”战斗机 SPF/DB 钛合金结构

(d) A310/320 飞机机翼检修口盖

图2 飞机上采用的部分SPF、SPF/DB构件

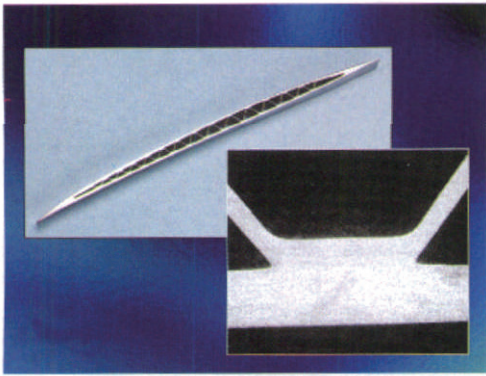


图3 罗·罗公司开发的空心叶片的剖面图及其具体结构

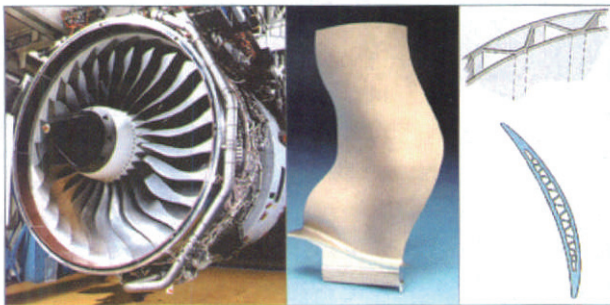


图4 钛合金宽弦空心风扇叶片

零件需要 70h 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 6h,同时减重 1.4kg。此外, NASA 正在研究的高速民用运输机(HSCT)的机翼段和下部等结构也采用了 SPF/DB 结构件。

在发动机领域,超塑成形/扩散连接组合工艺已经成为重要结构制造的关键工艺。作为大涵道比涡扇发动机的关键部件之一,钛合金宽弦空心风扇叶片是 SPF/DB 整体结构制造工艺的典型代表。英国罗·罗公司 1984 年开始率先采用 SPF/DB 技术研制钛合金宽弦无凸肩空心风扇叶片(剖面图及具体结构如图 3 所示),其特点是利用桁架结构取代

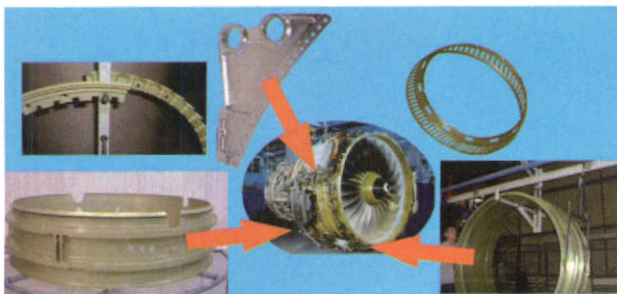


图5 航空发动机超塑成形零件

蜂窝结构,使叶片重量减轻了 15%,大大改善了叶片的气动特性,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 4 所示),其一级风扇直径为 295cm (116inch),整个风扇部件包括 24 片采用弯掠设计的空心钛合金风扇叶片,大大改善了叶片的气动特性^[5],在抗外来物损伤方面比早期的风扇叶片效率更高。

为了减轻结构重量、提高整体性能,英国 Aeromet、美国 Nordam 等公司在发动机及短舱的薄壁结构制造方面采用了超塑成形/扩散连接工艺,SPF/DB 构件在航空发动机上的应用包括检修舱门、短舱壁板、喷管挡板等,图 5 为航空发动机超塑成形零件^[6]。其中,波音公司研制的 SPF/DB 发动机尾喷口热挡板,比铸造结构减重 15%,节约成本 15%。

此外,近年来随着导弹轻量化、高强度要求的进一步升级,钛合金超塑成形/扩散连接整体结构制造技术引起了高度的关注。导弹弹体结构采用钛合金 SPF/DB 技术工艺后(见图 6),可实现无余量结构制造,省去了大量机加工时间、紧固件和装配作业时间。更为重要的是,SPF/DB 工艺有利于整体成形出具有薄壁空心、复杂形状、光滑表面和气动外形流畅的导弹弹体结构,整体结构成形

有利于最大限度地减少雷达散射截面。另外,采用钛合金超塑成形/扩散连接工艺制造的薄壁夹层空心结构还能有效实现埋入式结构的功能,在导弹弹体和动力装置一体化制造方面潜力巨大。

我国 SPF/DB 技术研究和应用的最新进展

我国超塑成形/扩散连接技术研究开始于 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单位之一,在钛合金、铝合金及铝锂合金等材料的 SPF 及 SPF/DB 技术研究和应用方面开展了大量的工作。开发的钛合金口盖(两层)、腹鳍(四层)、发动机整流叶片等轻量化整体结构已在我国飞机、发动机上得到了应用(见图 7)^[7],取得了显著的技术经济效益,并积极开展了钛合金宽弦空心风扇叶片、可调叶片、防火墙、卫星贮箱等超塑整



图6 导弹筒体、舵翼面采用的钛合金 SPF/DB 结构

体构件的成形工艺试验和应用研究。

最近,北京航空制造工程研究所在钛合金舵/翼面 SPF/DB 结构的研制中,率先提出了“设计-制造一体化”的研制思路^[8],由设计部门提供产品气动外形及各项性能指标要求,再由制造单位结合产品性能及 SPF/DB 工艺特点开展内部结构设计以及产品制造工作。在 SPF/DB 内部结构优化方面,通过产品成形过程的

数值模拟,对成形过程中的应力、应变和壁厚分布进行分析,初步确定成形参数,预测并排除成形过程中可能存在的风险;分析计算筋格尺寸、排布、配重形式、摆放位置能否满足构件强度、刚度、质量质心要求。协同设计的零件不仅能够满足使用性能指标要求,而且还具备良好的工艺性和可操控性,目前这种研制开发模式已在导弹舵翼面结构件研制中得到充分验证,取得了良好的效果。

我国在 SPF 和 SPF/DB 工艺研究和应用方面已经走过了 30 多年,

特色。在国内,北京航空制造工程研究所经过多年的努力,已经在实验室基础研究、小批量生产之间建立了良好的衔接机制,在“基础研究重工艺,小批生产重效益”思路的指导下,研究、生产和配套技术体系日趋完善。

(2)从生产能力和应用范围来看,我国已从蒙皮、壁板、口盖等单层 SPF 结构和两层 SPF/DB 结构类的次承力简单结构件,发展到多层(三层、四层)整体的翼面、框梁、叶片等复杂关键结构,从飞机的静态结构件应用发展到发动机、导弹的动部件应用,结构整体性大大提高。工艺和结构设计高度融合,在协同设计制造方面取得了重大进展。

(3)在 SPF/DB 零件小批量生产中正在采取各种措施提高设备使用效率、降低能耗、提高成品率,在零件成形制造过程中的工艺参数记录和操作可追溯性方面逐渐形成制度。其中,一些重要的工艺改进(如高温出装炉、“一模多件”等)在小批生产中已取得了良好效果。

(4)为了更好地发挥超塑成形/扩散连接技术在工程中的应用,北京航空制造工程研究所建立了企业标准

和规范,并积极与设计单位密切合作,在产品质量检测及性能评价体系方面开展了大量的研究工作。

SPF、SPF/DB 技术的发展趋势

(1)轻量化结构零部件研制已

进入“材料—设计—工艺—制造”一体化的新阶段。

CAD、CAE 计算机辅助设计技术正在成为 SPF/DB 结构研制中有力的辅助工具,在应力、应变、壁厚分布预测以及强度、刚度分析等方面的指导性作用正在逐步增强,并能够有效预测结构完整性。今后,工艺过程数值仿真、SPF/DB 内部结构优化等工作的深入开展将对 SPF/DB 轻量化整体结构扩大应用产生重要影响。

(2)探索超塑成形与其他焊接技术的工艺组合方式。

通过超塑成形/激光焊接、超塑成形/搅拌摩擦焊、超塑成形/热等静压等组合新工艺,进一步解决扩散连接难度大或超塑成形与扩散连接温度参数条件差异大的材料(如高温钛合金、钛铝间金属化合物、铝合金等)的结构制造问题。

(3)当前航空航天工业领域钛合金超塑成形/扩散连接工程应用的一个重要趋势是采用超细晶钛合金进行产品的研制。

引入超细晶钛合金可使零件的成形温度大大降低,有效减少零件表面的褶皱缺陷,零件表面质量好、后续表面处理容易。同时温度的降低还有利于保证模具尺寸精度并有效延长模具寿命。

(4)重视标准体系和质量管理体系的建设。

发展先进检测技术、提高检测精度,建立可靠的质量保证体系,制定质量控制程序和验收标准;另一方面,重视 SPF/DB 结构完整性评估体系的建设,从产品研制阶段就开始零件的使用性能研究,从而保障产品零件的服役性能。

本文共有参考文献 8 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要请与本刊编辑部联系。

(责编 淡蓝)



(a) 发动机空心整流叶片



(b) 飞机气动面四层钛合金结构

图7 北京航空制造工程研究所研制的超塑成形/扩散连接四层结构件

目前正在逐步进入研究—生产—应用的深入发展阶段,工艺基础研究和生产实际应用都取得了很大的进展。

(1)我国研究所、工厂和高等院校等从事超塑成形技术研究的单位在基础研究和生产应用方面都具备了成熟的人才条件和设备条件,各具