

典型先进航空钣金制造技术研究进展

Development of Advanced Manufacturing Technology for Aeronautic Sheet Forming

中航工业北京航空制造工程研究所 韩秀全

钣金零件制造技术是使飞机能同时获得结构效率和优良性能的基础制造技术之一,也是航空制造工程的支柱技术之一,其先进程度是衡量一个国家航空制造能力和水平的重要标志。近十几年来,新一代飞行器的不断问世推动了各国航空制造技术的发展,钣金制造技术也取得了长足进步。

钣金零件构成飞机机体框架和气动外形,是飞机零部件的重要组成部分。零件数量多(占整架飞机零件总数的50%)、种类多、形状复杂、质量要求高,加工难度大。钣金零件制造技术是使飞机能同时获得结构效率和优良性能的基础制造技术之一,也是航空制造工程的支柱技术之一,其先进程度是衡量一个国家航空制造能力和水平的重要标志^[1-2]。近十几年来,新一代飞行器的不断问世推动了各国航空制造技术的发展,钣金制造技术也取得了长足进步。

超塑成形 / 扩散连接技术

超塑成形 / 扩散连接技术(Superplastic Forming/Diffusion Bonding,简称SPF/DB)是利用某些材料在某一特定温度区间内同时具备超塑性和扩散连接性的特点,在一次热循环中完成超塑成形和扩散连接,从而制造出带有空心夹层整体结构的一种成形方法,是一种先进的近

无余量的整体结构件制造技术。它的深入发展及广泛应用对现代航空航天结构的设计和制造产生了重大影响,在国外被誉为21世纪大型复杂结构件的高效费比制造技术^[3-7]。

SPF/DB的主要技术优势体现在^[5-8]:

(1)零件经济性高,可以由一个零件替代原有需许多零件经机械连接或焊接组装在一起的大构件,极大地减少零件和工装数量,缩短制造周期,降低制造成本;

(2)结构整体性好,材料在扩散连接后的界面完全消失,使整个结构成为一个整体,极大地提高了结构的抗疲劳和抗腐蚀特性;

(3)可成形一般方法难以实现的复杂外形零件,材料在超塑成形过程中可承受很大的变形而不破裂,如钛板可成形出弯曲半径小到材料厚度的零件,这是用常规的冷成形方法根本做不到或需多次成形方能实现的;

(4)提高设计零活性,利用空心夹层结构,进一步提高结构承载效率,减轻结构质量;

(5)材料在超塑成形过程中流动应力很小,可以用小吨位的设备成形大尺寸的结构件,且加工的结构件无回弹,无残余应力,成形精度高。

从20世纪30年代初SPF技术的面世至今,随着航空制造领域轻量化、长寿命、高强度、高刚度的需求越来越高,SPF/DB技术经历了由实验室小规模基础工艺研究、典型结构工程化应用研究、复杂结构生产应用与深入发展3个阶段。

目前,SPF技术在国内外航空航天领域工程化应用广泛,例如F-15中有SPF/DB结构件70余件;F-18中有钛合金SPF/DB结构件20多件;在F-22中也采用了SPF/DB组合结构,如后机身钛合金超塑成形 / 扩散连接的隔热板等,采用SPF/DB结构件后,能使飞机减重10%~30%,成本降低25%~40%。

构件规格由小尺寸向大构件发展,如美国 F-22 飞机的后机身采用 8 块高强钛合金 SPF/DB 隔热板,尺寸为 $915\text{mm} \times 635\text{mm} \times (1\text{mm} \sim 4\text{mm})$; B-2 飞机上的钛合金 SPF/DB 零件尺寸为 $1200\text{mm} \times 3600\text{mm} \times 6.3\text{mm}$ 。结构形式从板材与板材扩散连接向板材与实体扩散连接发展,如北京航空制造工程研究所研制的导弹舵、翼面,在国内率先成功实现的空心-实体混杂结构的 SPF/DB (图 1),在刚度、强度满足设计要求的情况下,实现减重 50%。构件外形由平板或单曲率外形向复杂双曲率外形发展,如北京航空制造工程研究所研制的某型飞机腹部口盖为复杂双凸带扭转外形,其成功应用使国内大型 SPF/DB 构件研制水平跃进世界先进行列。

喷丸成形技术

喷丸成形技术是利用高速弹丸流撞击金属板材的表面,使受喷表层材料产生塑性变形向四周延展,表层面积增大,同时受到材料变形一致的限制,使板材产生弯曲变形的一种成形方法,是壁板类零件的主要成形方法之一。

喷丸成形技术的主要特点包括^[9-10]:

(1) 零件制造成本低:不需要成形模具,工艺装备简单,工艺准备周期短。

(2) 成形零件抗疲劳性能强:零件上、下表现均存在残余压应力。

(3) 成形范围广:零件尺寸大小不受喷丸室规格限制;既可成形变厚度蒙皮壁板,又可成形带筋整体壁板;既可成形单曲率简单外形零件,又可成形复杂双曲率外形零件。

自 20 世纪 50 年代初期成功应用于 Constellation (星座号) 飞机壁板零件生产之后,喷丸成形技术被广泛应用于航空航天壁板零件制造,包括 EM120、A10、A6、EA6、S3A、P3、

C5、C130、C141、F15、F5E、B1 等军用飞机及空客 A310~A340 系列,波音 707~777 系列,REGIONAL JET, DASH 7、DASH 8, L1011, MD11, MD80、MD90、MD95, DC10, ATR72, Do.228、Do.328 等民用飞机以及运载火箭 ARIANE-IV、ARIANE-V 和 ATLAS II 等^[1-2]。喷丸成形零件的特点也由早期的简单规则外形发展到复杂双曲率外形,由等厚度结构向变厚度结构发展,由组合式壁板向带筋整体壁板发展,由喷丸成形与压弯组合工艺向预应力喷丸成形发展,零件尺寸也向更大规格发展。

目前,喷丸成形技术在波音公司、空中客车、金属改进公司已经发展为一种相当成熟和专业化的壁板加工手段。所能成形整体壁板的最大长度达 35m 以上,可成形带弯曲和扭转的马鞍形复杂型面,结构形式

也包括口盖、凸台、加强边、斜削、加强筋、矮十字筋条等组合复杂结构。如图 2 所示为美国金属改进公司采用预应力喷丸成形技术制造的 A380 超临界机翼下壁板,它是迄今采用喷丸成形技术所获得的长度最大、厚度最大的构件。同时,德国 KSA 公司将数字化技术应用于喷丸成形工艺,开发了自动喷丸成形技术,减少了人工校形,壁板喷丸外形精度达到 $0.3\text{mm} \sim 0.5\text{mm}$,一次合格率为 100%,喷丸加工一件零件最快仅需 2h,极大地提高了零件制造质量和效率。该项技术被成功应用于 A380 激光焊接机身整体壁板的喷丸校形。

北京航空制造工程研究所紧追世界前沿技术,于 2006 年成功研制出 ARJ21 飞机超临界机翼整体下中壁板,该零件为复杂马鞍形带扭转外形、变厚度带局部加强及口盖区结构,使我国成为世界少数几个掌握大型超临界机翼整体壁板喷丸成形技术的国家。2009 年,利用自主设计开发的喷丸路径设计软件,结合数控喷丸成形技术,实现了喷丸成形工艺数字化设计,使复杂零件精确喷丸成形成为可能。同期,在世界上首次成形出复杂马鞍形高筋整体壁板(图 3),使我国的喷丸成形技术跃入世界领先水平。2012 年,采用预应力喷丸成形技术成功试制了铝锂合金焊接带筋壁板模拟件(图 4),论证了焊接带筋整体壁板喷丸成形的可行性,为未来轻

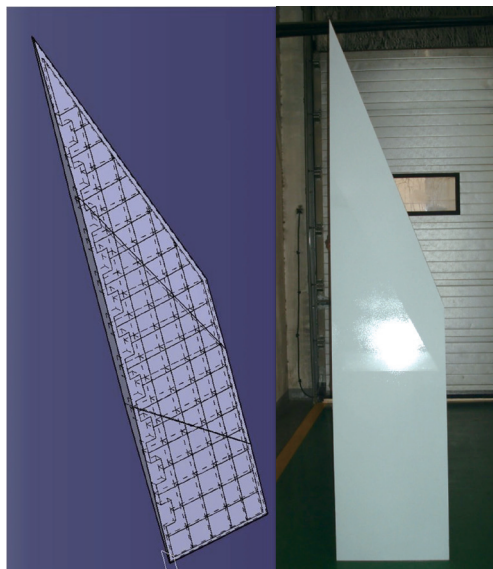


图1 空心-实体混杂结构的SPF/DB构件



图2 空客A380飞机及其喷丸成形外形翼下翼面整体壁板

质、高效焊接带筋整体壁板的应用奠定了重要的技术基础。

旋压技术

金属旋压成形技术是指毛坯随芯模旋转或旋压工具绕毛坯与芯模旋转时,旋压工具与芯模相对进给而使毛坯受压并产生连续逐点变形工艺,主要用于加工薄壁回转体工件^[2]。

旋压技术作为一种典型的连续局部塑性成形技术,是实现薄壁回转体零件的少无切削加工的先进制造技术,广泛应用于机械、电子、化工、汽车以及航空航天等国防工业领域。如航天飞机的鼻锥体、螺钉隔离捕捉器,航空发动机的外机匣、排气锥、机匣壳体、导弹头罩、制导舱等。其主要优点包括:材料利用率高、产品精度高、产品组织性能好、工艺柔性好、易于实现机械化与自动化、模具寿命长、生产成本小等^[11-16]。

随着航空航天等高技术产业的迅速发展,对薄壁回转壳体零件要求更加轻量化、整体化、形状复杂化,性能要求也更加苛刻,旋压技术也经历了新的技术飞跃。主要体现在:

(1) 高强铝合金、钛合金、高温合金等比强度高的难变形材料用量显著增多,热旋压技术应运而生。如北京航空制造工程研究所采用高温合金研制的某航空发动机机匣壳体(图5),替代原有锻造工艺,通过研究温度对高温合金旋压变形行为的影响机理,获得温度与芯轴转速、旋轮进给速度等工艺参数协调关系,解决了热态旋压温度控制、成形质量控制等关键技术,减少后续机械加工量、提高了零件力学性能。

(2) 大尺寸、高精度复杂薄壁零件需求增大,多道次复合旋压日臻完善。如西北工业大学采用数值模拟和实验相结合的方法,在自主研发的仿真平台基础上,开展不均匀塑性变形行为和成形缺陷的关联研究,毛坯、工艺和模具参数影响规律等研究,实现了带横向内筋大型复杂薄壁壳体复合旋压精确成

形。北京航空制造工程研究所采用GH3536高温合金成功研制某航空发动机外机匣,该零件为含直段、锥段、圆弧及法兰边的大型薄壁复杂回转壳体,通过研究多道次复合旋压过程中复合物理场作用下的材料塑性变形行为,解决了热态、多道次复合旋压温度与缺陷控制及成形精度的关系协调等关键技术,实现了难变形材料大尺寸、高精度复杂薄壁回转壳体零件的多道次复合热旋压,对提高我国大型复杂薄壁壳体的高质量、低成本、短周期制造技术水平和能力具有



图5 旋压成形某发动机机匣壳体

重大战略意义。

热成形技术

热成形技术是零件毛坯在高温下进行冲压成形的钣金零件制造技术。主要是利用金属材料加热软化的性质,降低材料的变形抗力,提高成形极限,减少弹性回弹,提高成形精度。主要应用于钛合金、镁合金、钼合金等常温下难变形的材料。主要工艺方法包括弯曲、拉深、胀形、翻边、翻孔、局部成形等^[1]。

从20世纪50年代开始,随着钛合金在航空航天以及军事上大量应用,热成形技术飞速发展,并迅速进入工程化应用阶段。目前,热成形技术广泛应用于军机、民机、飞机发动机、导弹等制造领域,如飞机后机身

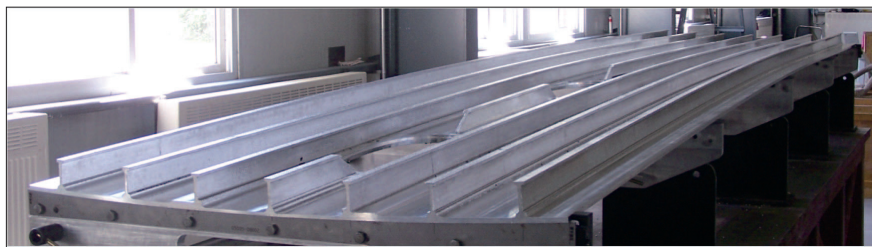


图3 喷丸成形的带筋整体壁板工艺验证件



图4 喷丸成形的焊接带筋整体壁板模似件

蒙皮、机尾整流罩、隔框,发动机短舱、热端部件、转接段,导弹壳体、弹翼等零件(图6)^[17-19]。

目前,随着民用飞机长寿命、轻

高,新材料的使用必不可少。如某型导弹飞行速度提升到3倍音速,其零部件服役环境温度高达400℃,此时普通的TC4材料已不能满足使用需



(a)飞机机尾整流罩蒙皮



(b)发动机转接段



(c)导弹零件部件

图6 典型热成形零件

量化,军用飞机高隐身性,导弹飞行速度提高等需求日趋加强,为满足性能要求,热成形技术也保持不断的创新,主要体现在:

(1)大尺寸、无余量装配需求,提升热成形外形精度控制:大尺寸零件导致零件回弹量大、零件与模具热膨胀差不易修正,而无余量装配对零件型面及外形尺寸要求更为严苛。如北京航空制造工程研究研制的TC4钛合金某型飞机后机身上壁板,为复杂带扭转双曲率外形,成形难度大。项目组通过研究TC4钛合金材料高温变形行为,建立热态材料本构模型,结合数值模拟技术成功预测零件回弹;并通过材料成形极限试验研究,建立热态成形极限曲线,据此修正模具,实现了大型复杂钛合金零件热态精确成形。

(2)材料多样化,扩展热成形应用领域:伴随零部件服役环境温度提

求。北京航空制造工程研究正致力于研究TNW700等新材料热成形技术,将为我国钛合金技术谱写新的篇章。

结束语

伴随着新型军、民机高效率、长寿命、低成本、高隐身性等需求的提高,航空制造技术得到了全面提升,航空钣金成形技术也取得了前所未有的进展,主要体现在:

(1)数字化技术成熟应用,推动精确钣金成形技术;

(2)材料多样化,零件复杂化,成就新兴钣金成形技术;

(3)基础科研技术储备,在关键时刻凸显能量,协助技术革新。

参考文献

[1] 曾元松. 先进航空板材成形技术应用现状与发展趋势,航空科学技术,2012(1):

1-4.

[2] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册——飞机钣金工艺. 北京:航空工业出版社,1992:1-3.

[3] 于卫新,李森泉,胡一曲. 材料超塑性和超塑成形/扩散连接技术及应用. 材料导报,2009,23(6):8-14.

[4] 李梁,孙建科,孟祥军. 钛合金超塑性研究及应用现状. 材料开发与应用,2004,19(6):34-38

[5] 李枫,陈明和,范平,等. 超塑成形/扩散焊接组合工艺的技术概况与应用. 新技术新工艺,2008(4):70-73.

[6] 黄晓辉,左秀荣,刘凤芹,等. Ti6Al4V合金超塑性的研究进展及应用现状. 材料研究与应用,2010(1):23-26.

[7] 丁桦,张凯锋. 材料超塑性研究的现状与发展. 中国有色金属学报,2004,14(7):1059-1066.

[8] 丁新玲,安孟长. 超塑成形技术研究及其在航空航天上的应用. 航天制造技术,2009(2):1-5.

[9] 曾元松,黄遐. 大型整体壁板成形技术. 航空学报,2008,29(3):721-727.

[10] 曾元松,许春林,王俊彪,等. ARJ21飞机大型超临界机翼整体壁板喷丸成形技术. 航空制造技术,2007(3):38-41.

[11] 侯红亮,余肖放,王耀奇. 国内旋压设备及其相关技术的发展与现状. 锻压装备与制造技术,2008,16-19.

[12] 刘建华,杨合,李玉强. 旋压技术基本原理的研究现状与发展趋势. 重型机械,2002(3):1-4,12.

[13] 赵刚要,张冉阳,郭正华. 难变形材料薄壁筒形件强力旋压研究进展. 热加工工艺,2012,41(23):85-90.

[14] 杨合,詹梅,李甜,等. 铝合金大型复杂薄壁壳体旋压研究进展. 中国有色金属学报,2011,21(10):2534-2550.

[15] 詹梅,李虎,杨合,等. 大型复杂薄壁壳体多道次旋压过程中的壁厚变化. 塑性工程学报,2008,15(2):115-121.

[16] 蒋华兵. 铝合金大型复杂薄壁壳体旋压成形关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2011.

[17] 杨伟俊,李东升,李小强,等. 复杂形状钛合金热成形零件工艺仿真及参数优化研究. 塑性工程学报,2009,16(1):42-46.

[18] 李鹏亮,张志. 钛合金热成形模具. 航空制造技术,2012(21):94-97.

[19] 李鹏亮,张志,曾元松. 钛合金机头罩固体颗粒介质成形工艺研究. 锻压技术,2012,10:60-62.

(责编 良辰)