

先进航空板材成形技术应用现状与发展趋势

Application and Development Trend of Advanced Sheet Metal Forming Technology

曾元松 / 北京航空制造工程研究所

导读: 板材成形技术是武器装备发展中至关重要的技术之一, 是一个国家军事技术能力和科技水平的重要组成部分。本文综合论述了以超塑成形/扩散连接技术、喷丸和蠕变时效成形技术、柔性多点模具蒙皮拉形技术和旋压成形技术等为代表的先进航空板材成形技术的应用现状, 总结和提出了航空板材成形技术的发展趋势和重点。

关键词: 板材成形; 超塑成形/扩散连接; 喷丸成形; 蠕变时效成形; 柔性多点模具; 旋压成形

Keywords: sheet metal forming; superplastic forming and diffusion bonding; shot peen forming; creep age forming; reconfigurable die; spinning forming

0 引言

板材成形技术在航空、航天、汽车、兵器等工业中占有非常重要的地位。以飞机制造为例, 据统计, 板材零件数量占整架飞机零件总数的50%, 其数量在战斗机中超过1万件, 轰炸机中超过4万件, 大型运输机和干线客机中达6万件之多^[1], 加工工时占全机的20%。可见, 板材零件制造对飞机制造质量、周期和成本有着非常重要的影响。

当前, 航空板材成形技术在深度和广度上都取得了前所未有的进展, 其特征是与高新技术结合, 在方法和体系上开始发生很大变化。计算机技术、信息技术、现代测控技术与板材成形领域的相互渗透与交叉融合, 推动了精密板材成形技术的发展。同时, 新结构和新材料的不断涌现, 也为板材成形技术提出了新的挑战。

1 超塑成形/扩散连接技术

超塑成形/扩散连接(SPF/DB)技术是利用某些材料在某一特定温度区内, 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。由于采用超塑成形及超塑成形/扩散连接制造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、降低生产成本等方面显示出极大的优越性, 被誉为现代航空航天工业生产的开创性技术, 广泛应用于航空航天飞行器的壁板、舱门、口盖、叶片、舵和翼等重要结构件^[2]。

目前, SPF/DB技术在飞机上的应用, 已从制造小尺寸构件发展到了大型整体构件。例如, 美国F-22飞机的后机身有8块高强钛合金SPF/DB隔热板, 尺寸为915mm×635mm×1~4mm。B-2飞机上的钛合金SPF/DB零件尺寸

为1200mm×3600mm, 厚度为6.3mm。幻影2000的SPF/DB前缘缝翼与传统结构相比, 零件数量减少67%, 缩短生产周期50%, 减重10%。北京航空制造工程研究所采用多达5件SPF/DB构件, 通过与激光焊接技术的组合, 制造出最大尺寸达1650mm×760mm的两层空心整体壁板构件, 并取得了很好的减重效果。

在发动机领域, 英国罗-罗公司首次将该项技术用于研制钛合金宽弦空心风扇叶片(图1), 每个叶片实现减重35%~40%, 相当于原叶片的1/3, 每

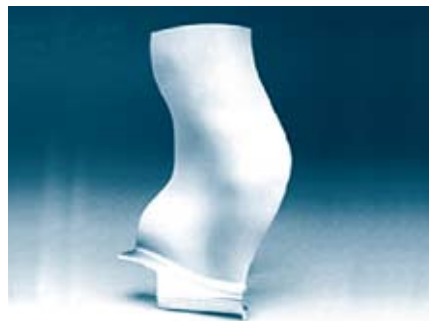


图1 遑达900发动机宽弦空心风扇叶片

台发动机装26片叶片可减重90.7kg,同时还提高了发动机效率,减少了燃油的消耗和涡轮盘装配工作量,降低了噪声,成为该公司在发动机研制领域技术领先的标志。另外,采用超塑成形/热等静压等工艺制造的SiC纤维增强钛基复合材料整体叶环将在推重比12~15级发动机中得到应用,不仅可以获得15%~78%的减重效果,而且可以显著提高使用温度和服役性能,将对未来航空发动机的设计和制造带来革命性变革,图2a、b、c分别为MTU、斯奈克玛和罗-罗公司研制的SiC/Ti复合材料整体叶环试验件。

在导弹领域,随着新型导弹高速、大过载飞行的需求,迫使导弹舵、翼和舱段必须向高强度、高刚度和轻量化方向发展,采用SPF/DB技术制造导弹舵和翼等构件将是必然发展趋势。图3为俄罗斯采用SPF/DB技术制造的新型导弹舵、翼和舱段样件。近几年来,北京航空制造工程研究所将CAD/CAE和SPF/DB技术有机结合起来,突破了空心-实体混杂结构一体化制备等关键技术,极大地促进了SPF/DB技术的应用,其中最大的结构尺寸达2500mm×500mm×65mm,在刚度、强度满足设计要求的情况下,实现减重50%。

近年来,为了进一步降低零件制造成本和提高生产效率,以及满足大型整体构件的制造需求,超塑性成形与其他连接工艺的组合技术正日益受到重视和发展,如超塑成形/激光焊接组合工艺、超塑成形/搅拌摩擦焊接组合工艺和超塑成形/热等静压组合工艺等^[3]。图4为波音公司采用搅拌摩擦焊/超塑成形组合工艺(FSW/SPF)研制了直径达4m的大型发动机唇口。

2 喷丸成形和蠕变时效成形技术

喷丸成形和蠕变时效成形技术是飞机机翼和机身壁板类构件的特殊成形方法。喷丸成形技术是利用高速弹丸流撞击金属板材的表面,使受撞击的表面及其下层金属材料产生塑性变形而延伸,逐步使板材发生向受喷面凸起的弯曲变形而达到所需外形的一种成形方法。由于喷丸成形技术具有不需要成形模具,且成形后的零件表面均形成残余压应力层,可有效改善零件的抗疲劳性能等优点,使它成为现代先进飞机金属机翼整体壁板的首选成形方法,已经被广泛应用于军民飞机和运载火箭的整体壁板零件制造中。图5为采用预

应力喷丸成形的A380机翼下壁板。

为了减少甚至消除喷丸成形后的人工局部校形,德国的KSA公司开发了自动喷丸成形技术,将数字化技术应用到喷丸成形过程中,取得了巨大的成功。图6为采用自动化喷丸成形技术研制的阿丽亚娜火箭壁板,壁板喷丸外形精度达到0.3~0.5mm,一次合格率为100%,喷丸加工一件零件最快仅需要2小时,完全消除了人工校形,极大提高了零件制造质量和效率^[4]。KSA公司还将该项技术成功应用于A380的激光焊接机身整体壁板的喷丸校形过程中。

自2003年以来,北京航空制造工

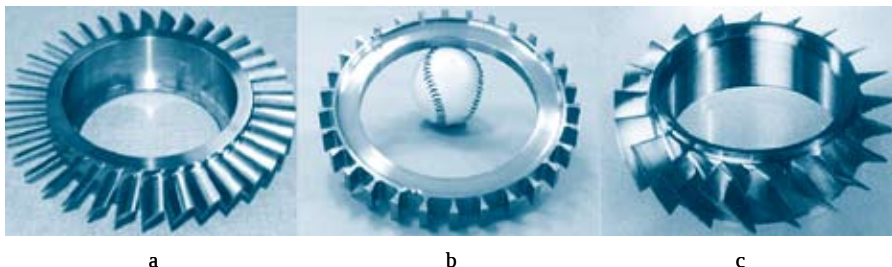


图2 SiC/Ti复合材料制备的整体叶环试验件



图3 俄罗斯采用SPF/DB技术研制的导弹舵、翼和舱段样件



图4 波音公司FSW/SPF组合制造的发动机吊舱唇口



图5 预应力喷丸成形的A380飞机机翼下壁板

程研究所系统开展了超临界机翼组合式整体壁板的预应力喷丸成形技术研究,突破了包括马鞍形和扭转外形预应力喷丸成形技术、超临界机翼整体壁板喷丸路径设计方法和柔性预应力夹具等一系列关键技术,于2006年成功研制出了ARJ21飞机大型超临界机翼整体壁板^[5]。自2008年以来,实现了带筋整体壁板预应力喷丸成形的一系列关键技术的突破,研制出了具有高筋复杂双曲率外形的整体壁板构件,与组合式壁板相比,实现了结构减重9%(图7)。

蠕变时效成形技术是利用金属的蠕变特性,将成形与时效强化同步进行的一种成形方法。与喷丸成形技术相比,蠕变时效成形技术具有残余应力

小、表面质量高和工艺重复性好等优点,尤其是将成形和材料时效强化同时完成,可以有效降低零件制造周期和成本。因此,蠕变时效成形技术用于机翼上壁板和焊接整体壁板时,具有明显的技术优势。例如,A380的机翼上壁板采用该项技术,成形后零件外形贴合度不大于1mm,每24小时可完成一件零件的成形^[6]。另外,将蠕变时效成形技术用于焊接整体壁板的成形,在成形零件外形的同时,还可达到消除焊缝残余应力,提高疲劳寿命的效果。图8为采用时效成形的焊接机身整体壁板模拟件,该模拟件的蒙皮与筋条之间采用激光双光束焊接,蒙皮和蒙皮之间采用搅拌摩擦擦焊^[7]。

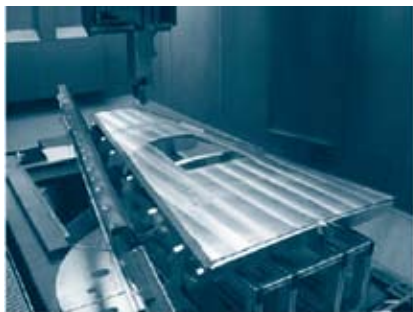


图6 采用自动喷丸成形的阿丽亚娜火箭燃料箱整体壁板

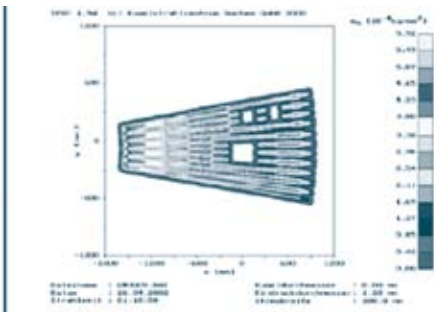


图7 预应力喷丸成形高筋整体壁板构件

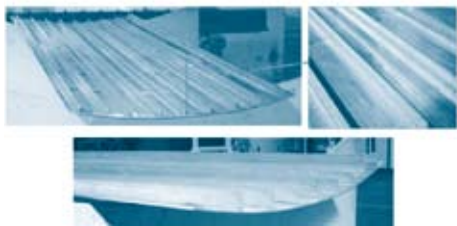


图8 蠕变时效成形的激光焊接/搅拌摩擦焊机身整体壁板模拟件

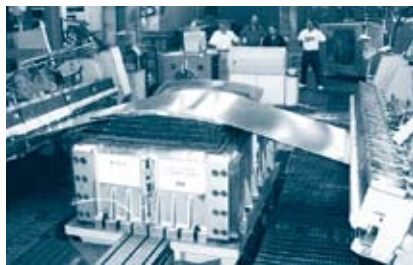


图9 美国的柔性多点模具蒙皮拉形系统

3 柔性多点模具蒙皮拉形技术

柔性多点模具是由一系列高度可调、规则排列的小冲头构成,可形成离散曲面的模具。其基本思想是采用离散的点来拟合模具的三维型面。相对于传统固定模具,采用柔性多点模具的成形方法具有如下优势:一套模具可以成形多个零件,减少固定模具的使用量,从而降低产品研制成本、减小模具库存;模具型面快速形成,缩短零件研制周期,易实现新产品快速研制。

美国自1999年起开展柔性多点模具蒙皮拉形技术项目,并于2002年研制出了一套台面尺寸为4ft×6ft的工程化应用柔性模具系统(图9),2004年在美国空军的某修理厂完成了工程验证,取代了该厂49%的固定模具,76%的蒙皮零件采用该套模具进行生产^[8]。

吉林工业大学从1990年开始开展柔性多点模具基本理论与成形设备的研究,提出了多道次多点成形、分段多点成形理论,目前研制出的多点成形机已成功应用于高速列车流线型车头、鸟巢中的弯扭钢结构件等三维曲面零件成形^[9-10]。自2004年开始,北京航空制造工程研究所在国内首次开展了柔性多点模具蒙皮拉形工艺方法的研究,目前已经突破了低成本轻量化模具本体设计制造、型面优化和控制以及拉形工艺和质量控制等方面的关键技术,研制出了台面尺寸为1824mm×1216mm的柔性多点模具,并成功试制出了飞机蒙皮零件,进入工程应用阶段^[11]。

作为一种新兴的柔性加工技术,柔性多点模具的应用可以解决多年来困扰制造业的模具数量庞大、模具设计制造周期长、模具型面修正耗时长、费用高等系列问题。将工艺数字化与柔性多点模具工装数字化紧密结合,可大力推进板料成形领域的数字化水平,为实现

零件的数字化精确成形提供了技术支持和保障。

4 旋压成形技术

旋压成形技术作为一种连续局部逐点变形的塑性加工工艺,具有无屑加工、柔性好、成本低廉等优点,适合加工多种金属材料,可以快速成形薄壁回转体零件。美国“战斧”式巡航导弹舱段、发射装置及发动机壳体、“民兵”洲际导弹发动机壳体喉型火箭内衬、“大力神Ⅲ”的助推器发动机壳体、“毒刺”导弹发动机壳体等都采用旋压技术加工。将旋压技术用于航空发动机机匣和罩体的制造,可以在确保零件材料性能与锻件相当的情况下,大大提高材料利用率,降低零件制造成本。图10为北京航空制造工程研究所采用旋压技术研制的发动机高温合金机匣构件。



图10 旋压成形的发动机高温合金机匣构件

近年来,将旋压技术与先进焊接技术结合用于制造大型整体零件成为一种趋势。图11为美国航空航天局(NASA)与洛克希德·马丁公司合作,利用搅拌摩擦焊和旋压成形组合技术研制出了直径达5.5m,深度达1.6m的2195铝锂合金火箭液体燃料罐圆顶^[12]。这项新技术使用了比普通铝合金质量更轻,强度更高的铝锂合金,不仅能够提高零件强度而且能够有效降低未来火箭液体燃料罐的重量,具有很高的技术与经济效益。



图11 2195铝锂合金火箭液体燃料罐圆顶

5 结束语

随着先进航空飞行器对高强、轻质、长寿命和耐高温等结构的需求越来越高,航空板材成形技术与结构设计、材料、分析测试以及其他制造技术的结合将越来越紧密,其未来发展趋势和重点主要有:轻量化整体构件成形技术在航空装备制造中的地位 and 作用越来越突出;轻质、高效、耐高温新材料制备及构件成形一体化技术将作为提高新一代航空装备性能的重要手段;与先进焊接技术的结合,突破了板材尺寸和设备台面尺寸的限制,使大型构件的制造成为可能;与数字化技术的相互渗透与交叉融合,将极大推动航空板材成形技术的发展。

AST

参考文献

- [1] 《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[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [2] 李志强, 郭和平. 超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势[J]. 航空制造技术, 2010(8): 32-35.
- [3] 郭和平, 曾元松, 韩秀全, 李志强. 飞机钛合金整体结构的超塑成形/焊接组合工艺技术[J]. 焊接, 2008(11):

41-45.

[4] Friese A, Lohmar J, Wüstefeld F. Current applications of advanced peen forming implementation[C]. 8th International Conference on Shot Peening (ICSP-8), Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2002.

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

[6] Zhan Lihua, Lin Jianguo, Dean T A. A review of the development of creep age forming: experimentation, modeling and applications[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51: 1-17.

[7] <http://asm.confex.com/asm/aero05/techprogram/paper-7238.html>.

[8] Simona S, Boyce M C. A finite element based die design algorithm for sheet-metal forming on reconfigurable tools[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2001, 123: 489-495.

[9] 蔡中义, 李明哲, 付文智. 板材多点成形中压痕缺陷的分析与控制[J]. 锻压技术, 2003(1): 16-19.

[10] 刘纯国, 蔡中义, 李明哲. 多点成形中压痕的形成与控制方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2004(1): 91-96.

[11] 曾元松, 白雪飘, 吴为, 邹方, 李东升. 柔性多点模具及其应用进展[J]. 航空制造技术, 2009(10): 42-45.

[12] <http://www.nasa.gov/exploratio/multimedia/highlights>.

作者简介

曾元松, 博士, 中航工业塑性加工技术首席技术专家。