

钣金成形技术在航空航天中的应用

卢文博 熊 然 张 珊 刘丽莉

(西安航天动力机械有限公司, 西安 710025)



摘要: 通过综述超塑性成形/扩散连接成形、旋压成形、蠕变时效成形、喷丸技术、拉伸成形具有代表性的先进钣金成型技术, 介绍了基本原理、技术特点及其在国内外航空航天制造领域应用情况, 并在此基础上简要提出了钣金成形技术发展的趋势。

关键词: 钣金成形; 超塑性成形/扩散连接; 旋压成形; 蠕变时效成形; 喷丸技术; 拉伸成形
中图分类号: TG306 **文献标识码:** A

Application of Sheet Metal Forming Technology in Aviation and Aerospace

Lu Wenbo Xiong Ran Zhang Shan Liu Lili

(Xi'an Aerospace Power Machinery Co., Ltd., Xi'an 710025)

Abstract: In this paper, the basic principles, technical characteristics and applications of some representative advanced sheet metal forming technologies, such as superplastic forming/diffusion bonding forming, spinning forming, creep aging forming, shot peening technology and stretch forming, are reviewed, and the development trend of sheet metal forming technology is briefly presented.

Key words: sheet metal forming; superplastic forming and diffusion bonding; spinning forming; creep age forming; shot peen forming; stretch forming

1 引言

钣金成形技术是一项关键的国防技术, 是航空、航天、武器装备等制造领域的基础, 是促进国防产品升级换代, 提升产品性能的重要支撑^[1]。钣金成形技术在航天航空领域的产品结构制造中得到了广泛应用, 如: 运载火箭、飞机、导弹壳体等。根据统计, 运载火箭的钣金零件约占全火箭零件总数的 60%~70%, 钣金成形的零件占飞机零件总重的 40%, 总共超过了 11 万件, 其中, 在大型运输机和干线客机制造中所用钣金成形的零件最多达到了 6 万件^[2]。

近些年来, 随着各个国家在航空航天领域的投入, 航空航天领域飞速发展, 所需求的零件更偏向于高强

度、轻质量、整体化, 对于金属材料的塑性成形技术提出了更高的要求, 传统的成形技术并不能够完全满足成形需求。一些先进钣金成形方式如超塑性成形/扩散连接成形、旋压成形、蠕变时效成形等技术逐渐成为航空航天领域的关键技术之一。本文着重介绍了钣金成形技术的原理和在航空航天产品上的应用。

2 超塑性成形/扩散连接

超塑性成形/扩散连接 (SPE/DB) 组合工艺技术是一种利用拥有特定微观结构的金属材料在特定温度区域和一定的应变速度的情况下, 使金属材料同时拥有超塑性和扩展连接性的特性, 在一次加热、加压成型过程中

金属零件同时完成超塑成形和扩散连接2道工序,制造出传统成形方式难以制备的复杂形状并且局部加强或者整体加强的大型整体结构件的精确成形方式^[3, 4]。扩散连接是一种精密的固态连接技术,将多个经过处理后的金属光洁表面在真空或者保护气氛中压紧在一起并加热至接近母材熔点温度范围,对金属材料施加一定压力使其局部区域发生缓慢的塑性变形,经过长时间的原子间相互扩散形成连接。扩散连接能够有效解决传统焊接等方法带来的部分缺陷问题。

超塑成形/扩散连接组合工艺技术由于其成本低、高效益、近无余量的优点,在现代航空航天领域得到了广泛的应用,如航空航天飞行器镍合金、高温合金、铝合金、钛合金等材料的翼面、壁板、发动机叶片等结构的制造^[5, 6],如图1所示。

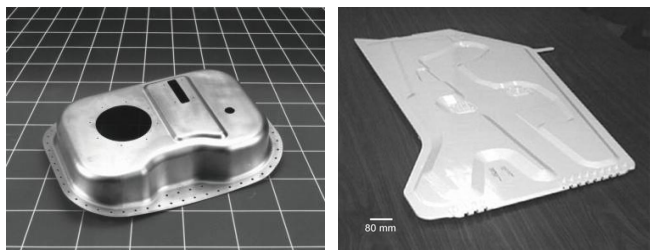


图1 SPE/DB制造的零件^[5, 6]

美国伊利诺斯研究所通过超塑成形/扩散连接组合工艺技术为军用飞机F-15制造隔框钛合金锻件,最终成品零件重量仅为10kg,而通过采用传统的成形方式制成锻件的重量达到了154kg,如采用超塑成形/扩散连接组合工艺技术制成的锻件重量仅为16.3kg,只有传统制造方式制成锻件的十分之一,材料利用率从6.5%升到61%,生产制造成本降低15%^[7]。国内某型号的发动机维修口盖成功采用钛合金SPF/DB件代替铝合金铆接件的方法,其零件重量减轻20.5%,生产制造成本降低50%。

中国航空工业625研究所通过采用多件超塑成形/扩散连接组合工艺技术与激光焊接技术相组合方式,成功制造出两层空心整体壁板构件,最大尺寸可达1.65m×0.76m,其零件重量和生产成本降低效果良好^[8]。近几年来,中国航空工业625研究所通过将计算机辅助技术和超塑成形/扩散连接组合工艺技术结合,实现了形状复杂零件整体结构一体化制备等关键技术,极大地促进了超塑成形/扩散连接组合工艺技术的进步,制造出来的结构件最大尺寸可达到2.5m×0.5m×0.065m,在塑性、强度等性能满足设计要求的情况下,成功实现了减轻50%质量的效果^[9]。

3 旋压成形

旋压成形技术是将平板或者空心坯料放在旋压机的模具上,通过旋转机床在特定的方向上对坯料施加一定的压力,使得受力点由点到线、由线到面,随着旋转发生局部的塑性变形,随着变形的进行由局部的塑性变形发展到整体表面的一种技术。旋压成形凭着省料、省力、产品精度高、工艺柔性好、加工设备简单等优点逐渐成为精密塑性成形技术的重要发展方向^[10~11]。

旋压成形技术适用于多种材料成形,被广泛地应用于航空航天领域^[12],由于其成形特性主要用于完成圆筒、圆锥件、半球体、双曲线形、环形以及带筋的筒件和管件等的成形。航空航天等国防工业领域产品如飞机发动机机匣、飞机浆帽、头罩,鱼雷壳体,导弹筒体、裙部、头锥,运载火箭的贮箱箱底、发动机喷管等部位非常适合采用旋压技术成形,典型产品如图2所示。

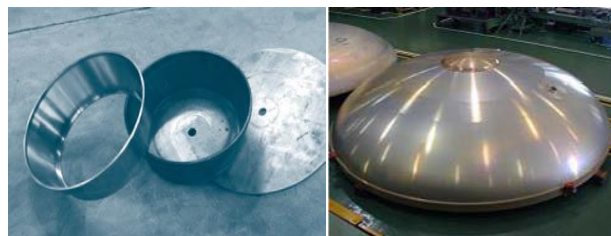


图2 典型旋压成形产品^[12]

美国航空航天局与洛克希德马丁公司展开合作,采用旋压成形的方式成功制造了猎户座飞船乘员舱前压力舱舱壁样件(如图3所示)、铝锂合金火箭液体燃料罐圆顶以及宇航飞船氧化剂箱等诸多航天装备用零部件^[13~15],其最大可成形板材的直径可达5.5m、厚度可达0.12m。日本在制造H-2A液体运载火箭时使用了旋压成形的直径达到3.8m的整体箱底。



图3 压力舱舱壁样件^[13~15]

国内四川航天长征装备制造有限公司的崔旭昌等人成功突破超薄壁筒形件整体旋压技术,通过多道整体旋压技术,成功成形 4800mm 长度的圆筒,并通过批产验证考核^[16]。

首都航天机械有限公司周磊等人提出了“一道次剪旋+多道次普旋”的旋压工艺方案开展超大直径贮箱箱底的整体旋压成形试验,完成了 $\Phi 3350\text{mm}$ 贮箱旋压试件,并成功机加工出正式产品如图 4 所示,开创了国内 3m 级超大直径贮箱箱底整体旋压成形的成功先例^[17]。



图 4 贮箱旋压试件^[17]

4 蠕变时效成形

蠕变时效成形是利用金属材料在长期处于一定的温度和压力时发生缓慢塑性变形的蠕变性能,将成形和时效强化同步进行的一种成形方式^[18]。基本的成形过程是先将热处理过后的金属构件利用机械加载或者真空加载的方式与模具工装型面固定,发生一定的弹性变形,然后将整体放入到热处理设备中,在设备中设置预定的时间和温度,经过蠕变和时效,弹性变形逐渐变为塑性变形。

蠕变时效成形相对于其他传统的金属塑性成形方式有着诸多优点,能够有效地降低发生零件加工裂纹的可能性,改善材料的微观组织和力学性能,具有较高的可重复性,成形后的零件具有良好的成形精度并且构件内部残余应力大部分被释放^[19]。

美国 Textron 公司生产的 B-1B 轰炸机的上下蒙皮壁板的复合曲面上翼面蒙皮和大力神 IV 火箭的正交格栅结构件均运用了蠕变时效成形方式。其中 B-1B 轰炸机的上机翼壁板尺寸为 $2.74\text{m} \times 15.25\text{m}$,厚度差异范围 $2.54 \sim 63.5\text{mm}$,而且壁板的最大贴合度误差不超过 0.25mm ^[20]。空中客车公司运用蠕变时效的方式生产了 A380 机翼薄板蒙皮,长度可达 33m,贴合度小于 0.25mm ,是目前世界上最大的热压罐设备^[21]。

蠕变时效成形技术在国内发展比较缓慢,但也取

得了一定的进展,国内的大型商用飞机 C919 和大运等军用运输机制造中也广泛应用蠕变时效成形技术,中国商飞的大型商用飞机 C919 飞机总装中心已经完成了热压罐水压试验,尺寸为 $5.5\text{m} \times 21\text{m}$,如图 5 所示^[22]。



图 5 C919 飞机总装中心的热压罐水压试验^[22]

5 喷丸技术

喷丸成形技术是通过发射装置发射大量高速弹丸反复冲击需要成形的金属零件毛坯,金属零件毛坯的表面受到冲击会发生塑性变形,同时会导致零件内部内应力的产生,从而达到零件的成形或提高金属零件性能的目的^[23~25]。随着技术发展,相对于以钢丸、玻璃珠为冲击材料的传统喷丸技术,出现利用激光、超声波、高压水等不同冲击原理的新型喷丸技术,成形和强化效果较传统方式有了很大提升^[26~29]。

欧美发达国家的喷丸成形技术已取得较高的成形精度,在空中客车公司和波音公司的产品中,喷丸成形技术已成功地应用于金属机翼整体成型,目前最先进的技术是空中客车公司在制造 A380 飞机超临界外翼整体壁板时所应用的喷丸成形技术。

国内的中国航空工业集团有限公司在 1995 年与其他国家航空制造公司项目合作时,成功地掌握了预应力喷丸成形超临界机翼整体壁板的关键技术^[30],中国航空工业集团公司 625 研究所利用喷丸技术成形的 ARJ21 机翼蒙皮如图 6 所示^[31]。



图 6 喷丸技术成形的 ARJ21 机翼蒙皮^[31]

6 拉伸成形

拉伸成形设计是一种比较传统的蒙皮成形方式,

在航空航天领域早已经广泛应用,发展得十分成熟。对于大型薄蒙皮来说,拉伸成形仍然是最为有效的成形措施。传统的蒙皮拉伸成形技术需要工人操作熟练度非常高,生产效率比较低,生产成本低,在生产过程中容易造成粗晶、破裂等多种缺陷,甚至导致零件报废,很难生产复杂形状的蒙皮,材料和人工的成本浪费非常大^[32]。近些年,随着国内外航空航天产品的研制和发展,对蒙皮拉伸成形的成形质量提出了更高的要求。

法国的空客航空公司在传统蒙皮拉伸成形技术上开始发展三维数字化研发管理平台技术,通过采用MBD数字模型生产过程进行精确控制,优化过程控制与过程质量,使一次合格率达到99.7%。美国波音公司在制造B737飞机过程中采用了计算机仿真优化与回弹补偿相结合的数字化工艺成形方案,大幅度降低了零件生产成本并且缩短了制造周期^[33]。

国内在蒙皮拉伸成形的智能化、数字化发展尚处于初级阶段。中航工业哈尔滨飞机工业集团在制造飞机薄壁件的过程中,为满足设计需要对柔性工装进行研究,成功开发出针对飞机蒙皮和壁板切割加工的柔性工装系统,该柔性工装系统设备能够大量节约工装成本,保证产品切割质量,大幅度缩短生产周期,对于产品研制有着重要意义^[34]。

7 结束语

钣金成形技术在航空航天领域得到了广泛应用,在提高航空航天产品的质量可靠性,降低产品研发成本,缩短研发周期等方面发挥着必不可少的作用,已成为我国航空航天和国防关键制造技术之一。随着计算机技术的发展,未来的钣金成形技术必将与数字化技术相结合,相互渗透相互交叉融合,将极大地推动钣金成形技术的发展。随着航空航天领域的发展,所需求的零件对于高强度、轻量化、整体化和复杂化的结构和性能的要求越来越高,通过与其他成形方式相结合,优化成形工艺,缩短研发周期。我国航空工业、航天工业制造的一个重要方向就是向着大型化、复杂化、结构功能一体化的重大工业装备设计和制造方向发展,钣金成形技术也将迎来更广阔的应用范围,同时也将迎来更大的挑战。

参考文献

1 易维坤. 航天制造技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003

- 2 龚从扬. 钛合金板料先进成形制造技术研究进展[J]. 模具技术, 2017(6): 48~54
- 3 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
- 4 Sieniawski J, Motyka M. Superplasticity in titanium alloys[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 24(1): 123~130
- 5 魏科, 马庆, 徐勇, 等. 大型/复杂模锻件省力成形工艺研究进展[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(5): 166~182
- 6 杨磊. 超塑成形技术在航空中的应用[J]. 科学视界, 2017(12): 26~28
- 7 Froes F H, Chen E, Boyer R R, et al. High performance metallic materials for cost sensitive applications[M]. Metal and Materials Society, 2002
- 8 闫亮亮. Ti-55双层板超塑成形/扩散连接试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015
- 9 曾元松. 先进航空板材成形技术应用现状与发展趋势[J]. 航空科学技术, 2012(1): 1~4
- 10 侯红亮, 王耀奇, 李晓华, 等. 先进钣金成形技术在航空航天领域的应用(上)[J]. 金属加工(热加工), 2008(13): 22~24
- 11 杨合, 詹梅, 李甜, 等. 铝合金大型复杂薄壁壳体旋压研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2534~2550
- 12 赵琳瑜, 韩冬, 赵立武, 等. 旋压成形技术和设备的典型应用与发展[J]. 锻压技术, 2007, 32(6): 18~26
- 13 李晓红, 徐可, 付迎春. 美欧军事强国大力发展超大型金属零件先进成形装备[J]. 国防制造技术, 2009, 3(1): 6~12
- 14 李宝蓉, 张丽娜. H-2B运载火箭贮箱制造技术与应用[J]. 航天制造技术, 2008(5): 35~37
- 15 肖择. J-2X发动机首次燃烧稳定性试验成功[J]. 上海航天, 2011, 28(6): 34
- 16 崔旭昌, 杜尚军, 刘声海, 等. 超长薄壁筒形件整体旋压技术[J]. 模具制造, 2019, 19(6): 20~22
- 17 周磊, 杨国平, 刘凤财, 等. 超大直径贮箱箱底整体旋压成形技术[J]. 锻压技术, 2021, 46(3): 151~157
- 18 Harnbrick D M. Age forming technology expanded in an autoclave[J]. Society of Automotive Engineer, 1986, 4(6): 649~664
- 19 Sallah M, Peddieson J, Foroudastan S. A mathematical model of autoclave age forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1991, 28(1-2): 211~219
- 20 李恒, 傅铭旺. 材料塑性加工制造: 行为、性能、建模与控制[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(4): 84
- 21 Zhan Lihua, Lin Jianguo, Dean T A. A review of the development of creep age forming: Experimentation, modelling and applications[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 51(1): 1~17

(下转第34页)