

# 钛合金超塑成形 / 扩散连接空心结构在空空导弹舵翼面上的应用

## Application of Titanium Alloy Superplastic Forming/ Diffusion Bonding in Air-to-Air Missile Rudder and Wing

中航工业中国空空导弹研究院 张 鹏 刘献伟  
中航工业北京航空制造工程研究所 廖金华

**[摘要]** 相对于传统金属机加或蒙皮骨架焊接结构,将钛合金超塑成形/扩散连接工艺方法应用于舵翼面空心结构的设计及其制造,在满足超音速气动加热和大载荷强刚度严苛的要求下,可显著降低超音速空空导弹舵翼面的重量(30%~50%)、提高导弹性能;并改善钛合金加工工艺性,缩短了生产周期,降低了生产成本,同时对超塑成形/扩散连接舵翼面结构设计、成形工艺、验证试验和质量控制等问题进行了探讨。

**关键词:** 超塑成形 / 扩散连接 (SPF/DB) 舵翼面成形工艺 验证试验与质量控制

**[ABSTRACT]** Compared with the traditional metal machine-finishing structure or the outer covering skeleton welding structure, about 30%~50% weight may be cut off if titanium alloy superplastic Forming/ diffusion bonding hollow structure is applied, which gains great advantages in flight range and meets the supersonic aerodynamic heat and high strength & rigidity severe request. At the meantime, the processing technique is improved, the production cycle is shortened, the productive reduction is costed greatly. Structural design, molding process, validation test and quality control etc. in rudder and wing production is discussed.

**Keywords:** Superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) Rudder and wing Molding process Validate test and quality manipulation control

超塑成形/扩散连接是二十世纪70年代发展起来的以整体结构成形的工艺技术,即 SPF/DB 技术,它是利用具有特定显微组织钛合金,在适当的温度及压力下,具有较大的材料延伸率和良好的扩散性能的特点,成形整体空心结构,过程如图1所示。

利用 SPF/DB 组合工艺技术成形钛合金空心结构,可避开钛合金机械加工的缺点,缩短生产周期,降低制造成本,减重效果明显;提高结构完整性,增大结构设计自由度。由于 SPF/DB 组合工艺技术具有优良的成形工

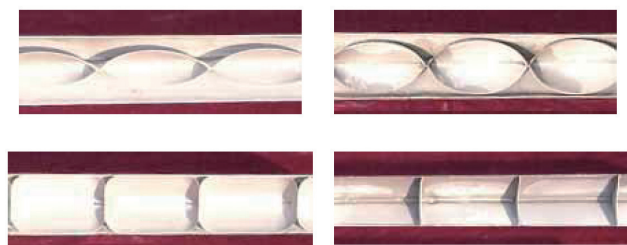


图1 SPF/DB结构成形过程图

Fig.1 Process diagram of SPF/DB structure

艺特性,以美国为代表的国家正在大力推行该项技术在航空军事领域的应用,取得了显著的应用效果。目前,国内开展 SPF/DB 技术研究的厂家包括北京航空制造工程研究所、北京亚太公司以及中南工大、哈工大、南航等高校的重点实验室等,其中北京航空制造工程研究所已经完成相关技术的工程化工作并在国内航空航天领域内实现了批产应用,其应用领域包括飞机机翼、垂尾、操纵舵、舱门、口盖、骨架、发动机叶片、燃料贮箱等<sup>[1]</sup>。

大过载、高机动性、高耐温性和苛刻的重量限制,是空空导弹总体结构研制发展的趋势性要求。以往空空导弹多采用铝合金机加结构或钛合金骨架蒙皮焊接结构,具有加工周期长、材料利用率低、制造成本高、产品平均密度大(2g/mm<sup>3</sup>左右)等特点;气动加热情况下,铝合金在250℃的强度下降50%,300℃基本失去承载能力,而钛合金在300℃的强度下降23%,可以采用适当的安全裕度设计,就能满足结构的耐高温要求<sup>[2]</sup>。钛合金超塑成形/扩散连接(SPF/DB)工艺使飞行器结构具有重量轻(减重30%~50%)、比强度和比刚度高、成形性好、可设计性高,有利于减重增航、大幅提升武器性能等特点,是解决导弹性能要求高、重量要求严的有效途径。

## 1 结构及成形工艺

### 1.1 舵翼面结构设计

钛合金 SPF/DB 舵翼面材料常用 Ti-6Al-4V (TC4),采用四层板结构,形成上下蒙皮加内部展向、弦向分布

的加强筋构造(见图 2),通过调整四层钛板的厚度、加强筋和配重的分布来实现舵面重心(以保证气动弹性稳定性要求)、舵翼面重量、强刚度等结构要求,达到综合优化状态。为保证结构的整体性,接头部位或配重通过在板料超塑成形/扩散连接进行前预埋入实心钛板实现,成形过程完成后,实心钛板也固定在了结构件指定位置,从而实现接头部位的强度和重心调整的要求。

对于 SPF/DB 舵翼面结构有限元模型,因加筋板部分厚度都远小于其他二维参数,所以一般选用二维有限元单元,接头或配重部位采用三维实体单元对模型进行离散化。在有加强筋的部位,加强筋已经和面板完全连为一体,其连接界面已经消失,因此认为它们成为一个整体,在建模时按整体处理,即只厚度增加,不在结构上区分。根据实际使用中舵翼面承受的最大分布气动载荷、实际边界支撑进行载荷施加和边界约束,对形成的有限元模型进行强刚度分析,结果见图 2。

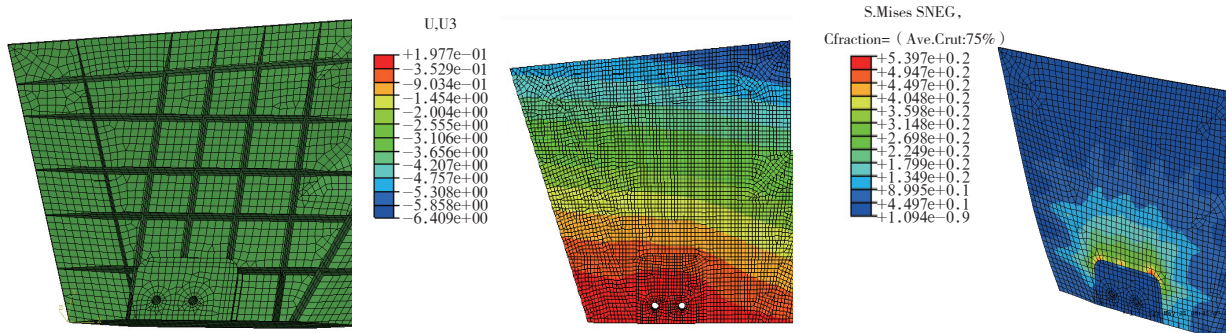


图2 舵面内部结构及强刚度分析  
Fig.2 Internal structure and strength and stiffness for rudder analysis

### 1.2 成形工艺

舵翼面采用典型的 SPF/DB 四层结构加实体扩散工艺制造,工艺流程为:下料、除油、酸洗、毛坯组焊、检查气密性、装模入炉、升温、蒙皮成形、夹芯扩散连接、夹芯 SPF、夹芯与蒙皮 DB、出炉取件、外观检查、切割、检验。

SPF/DB 四层结构成形工艺过程,首先将四层钛合金板材组合焊接成具有两个外层气腔和一个内层气腔的毛坯口袋,预留出内外层进气管口,在成形温度下分别对内外层气腔进行通气(高压氩气)、排气等控制,即为“外层面板 SPF →内层芯板 DB →内层芯板 SPF →内外层板 DB”4 个工步。整个工艺过程在一个热循环中完成。DB 接头金相检验焊合率达 100%,表面平整,外型依靠模具型腔保障。

### 1.3 工艺参数设计

超塑性金属的变形属于粘性流动,其流动方程可表达为  $\sigma = K\dot{\epsilon}m$ 。上式表明,流动应力与应变无关,与应变速率有关;材料的流动应力与变形速率受温度、压力及时间等参数影响。这些参数所确定的钛合金舵翼面 SPF/

DB 工艺规范将直接影响零件的质量和强刚度性能。

温度是影响扩散连接质量的重要工艺参数。它直接或间接的影响着舵翼面扩散连接质量。钛合金通常在 870℃ ~1280℃ 温度范围内只要压力和时间合适,都能得到较好的焊接质量。对于 TC4 来说,  $\alpha - \beta$  相变温度为 940℃ ~995℃,温度超过 940℃,  $\alpha$  相开始向  $\beta$  相转变,随温度的增加,转变加快,同时晶粒逐步增大,影响超塑成形和扩散连接的顺利进行。因此,舵翼面 SPF/DB 所选择的温度在 870℃ ~940℃ 范围内,在材料具有超塑性能的前提下,保障扩散连接质量。

压力是扩散焊接表面能否紧密接触的重要因素。扩散连接压力往往高于超塑成形压力且与接头强度有着密切关系,因此扩散连接时必须有足够的挤压力,才能使被连接表面之间的距离缩短到原子间相互作用的距离内,才能保证金属原子的扩散;但是压力不能过高,否则对模具、设备和构件变形均有不利影响。舵翼面零

件成形过程采用气压扩散的方式进行,所选择的气压在 1.0MPa~3.5MPa 之间进行超塑成形和扩散板连接。

SPF/DB 舵翼面制造中,时间也是个重要参数,在一定的温度和压力下进行扩散连接时,不仅被连接表面的蠕变、扩散与时间有关,而且接头强度也是随着连接时间的增加而提高,直至达到基体金属的强度。超塑成形复杂的构件时,也应有适当的保压时间,如果时间过长,晶粒进一步长大,导致材料的塑性下降。一般来说,温度高、压力大可缩短保压时间。据上分析及试验验证,舵翼面成形工艺参数选择:87℃ ~930℃ /1.0MPa~3.5MPa/120min~150min 的工艺参数,可成形出整体质量符合要求的结构。

## 2 验证试验与质量控制

SPF/DB 零件研制中,产品的重量、强刚度等指标的综合满足,需要仿真计算、样件研制和验证试验的数次迭代来实现。除零件外形要求外,舵翼面研制中一般主要进行静力强刚度试验和颤振分析两项验证。

在进行静力强刚度试验时,由于舵翼面的蒙皮和内部筋条都是薄板,不易采用常规的分区打孔加载方式,一般采用胶布带加载或气囊加载方式。该加载方式可以比较真实模拟舵翼面在实际飞行中承受不均匀分布的面载,对舵翼面进行全面的强刚度考核。

在结构验证中必须考虑舵面和全弹的颤振特性。可采用 MSC.Nastran 软件中的气弹模块,建立舵面和全弹的颤振模型,采用 SPF/DB 舵面与舵机安装后实测地面模态数据,修正颤振模型后进行颤振分析,以确定舵面的配重状态和加强梁的最终布局型式。

SPF/DB 舵翼面的质量和结构完整性是其在空空导弹上获得应用的关键所在。质量保证工作主要取决于零件的复杂程度和所承受的工作应力状态。简单的 SPF/DB 构件只需进行尺寸检验、金相检验和破坏试验<sup>[3]</sup>,对于空空导弹用 SPF/DB 舵翼面,则需开展更多的质量保证检验项目,需对舵翼面产品生产全过程进行监控。根据产品的具体特点,一般应进行如下检验项目:(1)原材料检验、理化分析及力学性能测试;(2)随炉式样钛板扩散件撕裂力学性能测试;(3)产品外观质量检验;(4)产品结构尺寸检验;(5)产品质量质心检验;(6)产品 X 光无损探伤检验;(7)产品超声波探伤检测;(8)强刚度检测。除此之外,如果对某项 SPF/DB 产品有怀疑,还可进行下列抽样检查:金相、壁厚检查、气体含量和机械性能。麦道公司的检验方法是:目测表面的完整性,然后用超声波检验结构完整性和零件的厚度;用 X 射线照相检查内部加强筋和成形情况,然后进行液体渗透,检验成形时可能出现的裂纹。

### 3 结论

钛合金 SPF/DB 舵翼面研制是结构设计、成形工艺、强刚度以及产品所要求的综合性能的组合选择,是不断分析和验证的过程;其中结构设计、成形工艺、验证试验、质量控制是舵翼面研制中的关键技术问题,目前试制出的产品已通过地面静力强刚度试验和大过载飞行弹道的试验考核,验证了钛合金 SPF/DB 工艺方法在先进空空导弹上应用的可行性;随着空空导弹飞行速度、机动过载和减轻结构重量要求的提高,钛合金 SPF/DB 舵翼面成形技术可望在导弹研制中得到更广泛的应用。

#### 参考文献

- [1] 王哲. 钛合金超塑成形 / 扩散连接技术在飞机结构上的应用. 钛工业进展, 1999(3):23-25.
- [2] 曹运红. 钛合金成型工艺在飞航导弹上的应有研究. 飞航导弹, 2002(7):51-61.
- [3] 李志强, 郭和平. 超塑成形 / 扩散连接技术的应用与发展现状. 航空制造技术, 2004(11):50-53.

(责编 亿霖)

(上接第 94 页)

- [2] Luo Y F, Zhao Y, Duan Y X, et al. Surface and wettability property analysis of CCF300 carbon fibers with different sizing or without sizing. *Material and Design*, 2011, 32: 941-946.
- [3] Rezaei F, Yunus R, Ibrahim N A, Effect of fiber length on thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites, *Mater. Des.*, 2009, 30: 260-263.
- [4] Kamik S R, Gaitonde V N, CAMPOS R J, et al. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model, *Mater. Des.*, 2008 (29): 1768-1776.
- [5] 余治国, 杨胜春, 宋笔锋. T700 和 T300 碳纤维增强环氧树脂基复合材料耐湿热老化性能的对比如. *机械工程材料*, 2009, 6(33): 48-51.
- [6] 过梅丽, 肇研, 许凤和. 先进聚合物基复合材料的老化研究 - I. 热氧老化. *航空学报*, 2000, 21(4): 62-65.
- [7] Kumar B G, Singh R P, Nakamura T. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. *Journal of Composite Materials*, 2002, 36(24): 2713-2733.
- [8] Selzer R, Friedrich H K. Influence of water up-take on inter-laminar fracture properties of carbon fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Materials Science*, 1995 (30): 334-338.
- [9] Selzer R, Friedrich K. Mechanical properties and failure behavior of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture. *Composites*, 1997, 28A: 595-604.
- [10] Dai Z S, Shi F H, Zhang B Y, et al. Effect of sizing on carbon fiber surface properties and fibers/epoxy interfacial adhesion. *Applied Surface Science*, 2001, 257: 6980-6985.
- [11] Dursel D S, Wightman J P. Surface analysis of desized and sized carbon fiber. *Carbon*, 1999, 37(7): 1105-1114.
- [12] Song W, Gu A J, Liang G Z, et al. Effect of the surface roughness on interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy resin composites. *Applied Surface Science*, 2011, 257: 4069-4074.
- [13] Zhang R L, Huang Y D, Liu L, et al. Effect of the molecular weight of sizing agent on the surface of carbon fibers and interface of its composites. *Applied Surface Science*, 2011, 257: 1840-1844.
- [14] Dilsiz N, Weightman J P. Surface analysis of unsized and sized carbon fibers. *Carbon*, 1999, 37: 1105-1114.
- [15] Kim T H, Vijayalakshmi S, Son S J, et al. A combined study of preparation and characterization of carbon molecular sieves for carbon dioxide adsorption from coals of different origin. *Journal of Industrial*, 2003 (9): 481-487.
- [16] Donnet J B, Bansal R C. *Carbon F. 2<sup>nd</sup> Edition*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1990.
- [17] Felix N. Nguyen, Yoshifumi Nakayama, Daigo Kobayashi, et al. Carbon fiber's surface and its effects on an interphase formation for ultimate adhesion-related performance. *SAMPE 2012*. Baltimore America. May 21-May 24.
- [18] Seizer R, Friedric K. Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(6): 595-604.

(责编 亿霖)