

超塑成型 / 扩散连接钛合金气动面表面沟槽对其强刚度的影响分析

阳 峰, 姚千斌, 成晓杰, 张 鹏

(中国空空导弹研究院, 洛阳 471009)

[摘要] 超塑成型 / 扩散连接是一种先进的钛合金制造技术, 采用该技术, 4层结构的钛合金产品表面存在沟槽问题, 对某气动面表面沟槽的成因和对强刚度的影响进行了浅析, 评估了表面沟槽对该产品强刚度的影响水平。

关键词: 超塑成型 / 扩散连接; 钛合金; 沟槽; 强度; 刚度

Effects of Aerodynamic Surface's Grooves on SPF/DB Titanium Alloy Part's Strength and Stiffness

YANG Feng, YAO Qianbin, CHENG Xiaojie, ZHANG Peng

(China Airbrone Missile Academy, Luoyang 471009, China)

[ABSTRACT] SPF/DB is an advanced manufacturing technology for titanium alloy, there are grooves on the surface of the products with four layers of structure, this paper not only analyzed the cause and effect of the groove on the aerodynamic surface and control surface, but also evaluated the effect size of strength and stiffness to the product.

Keywords: Superplastic forming and diffusion bonding; Titanium alloy; Groove; Strenth; Stiffness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.12.092

超塑成型 (Superplastic Forming, SPF) 是利用材料的超塑性来成型零件的一种工艺方法。超塑成型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。扩散连接 (Diffusion Bonding, DB) 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^[1]。

如果一种材料同时具备超塑性和扩散连接特性, 二者所需温度和压力条件又非常接近, 则可以在一个热循环中完成超塑成型和扩散连接, 这就是超塑 / 扩散组合成型工艺技术。与传统制造工艺制造的零件相比超塑 / 扩散组合成型工艺技术具有结构重量轻、成本低、整体性好、成形质量高等优点, 已成为航空、航天领域中一种先进的制造技术, 大大地提高了构件的设计自由度及结构效率^[2]。

钛合金是最早得到应用的超塑性材料, 主要合金有 Ti-6Al-4V、Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo、IMI550、Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 等材料, 近年来高温钛合金 (IMI834)、钛基金属间化合物 (TiAl) 以及高温合金 (GH4169) 的超塑性研究和应用得到了航空航天有关部门的高度重视^[3-4]。

在某产品的研制过程中, 基于产品具有大过载、高机动性的特点, 对产品的气动面结构提出了很高的要求, 设计人员希望设计一种重量轻、强度高, 在高温条件下力学性能较好的新型结构气动面。传统铝制材料整体成型和夹芯铆接结构与钛材蒙皮骨架结构难以满足要求, 而超塑 / 扩散钛合金结构零件进入了设计人员的视野。事实证明, 超塑 / 扩散钛合金零件能够比较好地满足设计人员的设计需求, 利用该技术制造的零件顺利地通过了各类试验的考核, 各项性能指标表现出色。

随着产品需求数量的增加, 在科研试制过程中并不严重的产品表面沟槽问题后期不断出现。尤其是沟槽的不可控制和不可预见得到了充分的体现, 它会出现在不同区域、不同方向, 并在长度、深度、连续性等方面有着各自不同的表现。

对于设计人员而言, 结构件的强刚度是最重要的指标之一, 为了评估表面沟槽对小型钛合金超塑 / 扩散零件的影响, 本文以某小型气动面及控制面为例, 对其进行了详细的数值仿真及静力强度试验, 分析表面沟槽对零件的强刚度影响程度。

同时也希望借由这项工作对由超塑 / 扩散工艺带来的表面沟槽的影响做一些分析尝试, 为后续的使用及

工艺改进工作提供支撑及借鉴。

1 表面沟槽成因分析

1.1 零件工艺过程

用于 SPF/DB 组合工艺的扩散连接方法主要有 3 种: 小变形固态扩散连接、过渡液相扩散连接和大变形 / 有限扩散连接。在扩散连接过程中应采用惰性保护气体或真空, 以防止氧化层的形成和生长^[2]。

在采用 SPF/DB 组合工艺进行多层结构的生产中, 可以先 DB 后 SPF(DB/SPF), 也可以先 SPF 后 DB(SPF/DB)。DB/SPF 工艺过程中, 构件的芯板结构由板面的止焊剂图案而定, 构件生产可在一次加热循环中完成, 也可分为两道工序。一道工序的特点是零件在生产过程中无需开模; 两道工序则有以下优点: DB 可用气压或机械压力, 也可选用其他连接技术^[2]。

某小型气动面内部结构设计采用 4 层结构, 以增强刚度和承受面集中载荷的能力。

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, 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、排气等控制, 内层芯板先扩散形成筋格图形, 在吹塑成为立筋, 同时伴随完成了外层的成形和内外层之间的扩散连接。

1.2 表面沟槽成因分析

钛合金超塑 / 扩散零件所采用的 SPF/DB 工艺, 将直接影响零件的强度和性能。在 SPF/DB 工艺过程中, 主要的工艺参数有温度、压力、时间、加压速率等。各参数之间有着相互依赖的密切关系。在上述成型过程中, 如果因为种种原因, 如型腔内部温度分布不均匀, 局部气体压力不足, 超塑成型程度不够充分, 立筋的成型没有到位, 内部两层薄板的变形不完全等等, 则会在立筋部位的相应表面形成沟槽。

从上述分析中可以看出, 沟槽是在产品的成型过程中发生的, 在“人、机、料、法、环”的因素中, “法”即工艺成型方法本身的原因更大一些。这也使得沟槽具有不可控制、不可预见的特性。对于成型工艺过程的控制、对于工艺参数的掌握等因素也毫无疑问对沟槽的产生具有重要作用。

2 沟槽影响的数值仿真分析

在对某型产品气动面及控制面表面沟槽的分析过程中, 选取钛合金气动面及控制面各 3 片, 其中包括一片无沟槽状态产品, 一片单面沟槽严重的产品, 一片双面均有沟槽状态的产品。根据产品实际状态一一建立对应有限元模型, 对其进行数值仿真计算, 之后对所有产品进行静力强度试验, 以采用数值仿真验证试验。

2.1 数值模型

图 1 为某型控制面的实物与数值仿真模型对比图(图中未对实物及模型展开全貌), 图 2 为气动面的实物与数值仿真模型对比图。

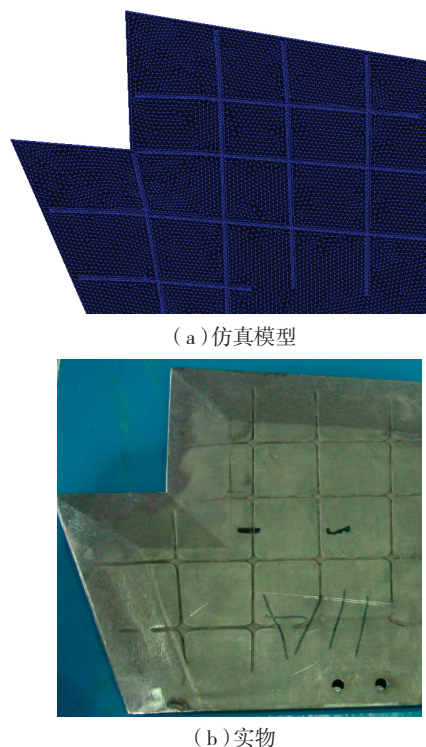


图1 控制面实物与仿真模型对比

Fig.1 Comparison of physical and simulation models for an control surface

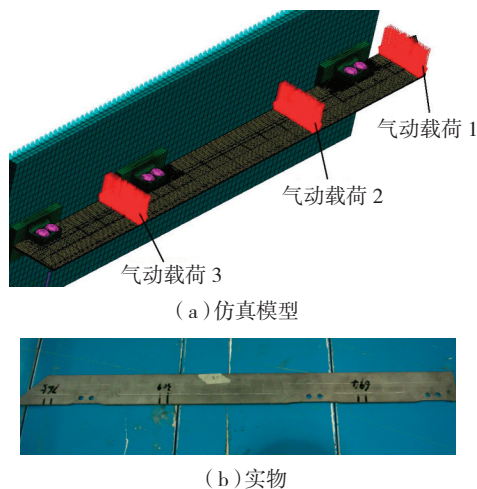


图2 某气动面实物与仿真模型对比

Fig.2 Comparison of physical and simulation models for an aerodynamic surface

在气动面建立有限元数值模型时, 考虑到与静力强度试验的一致性, 在建立模型时考虑了夹具及连接的形式, 计算中采用了基于大挠度理论的大位移 / 大应变策略以模拟几何刚度的影响(表 1)。

表1 有限元数值模型气动面与安装座接触关系

数值模型	安装座	气动面	底座
安装座	——	接触	粘合
气动面	接触	——	——

2.2 数值分析结果

图 3~8 为无沟槽控制面与单面沟槽控制面和无沟槽气动面与单面沟槽气动面数值分析结果。

3 试验验证情况

3.1 试验条件及方法

为了验证数值仿真的正确性,考核表面沟槽对某控

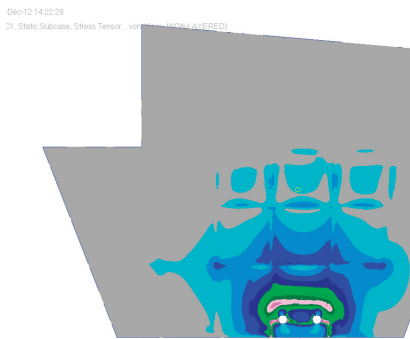


图3 无沟槽控制面应力分布云图
Fig.3 Stress distribution diagram of control surface without grooves

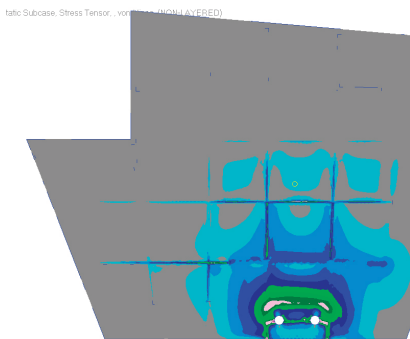


图4 单面沟槽控制面应力分布云图
Fig.4 Stress distribution diagram of control surface with one side grooves

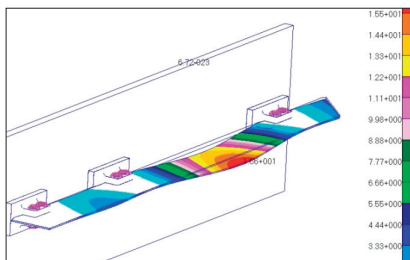


图5 无沟槽气动面变形分布云图
Fig.5 Deformation distribution diagram of aerodynamic surface without grooves

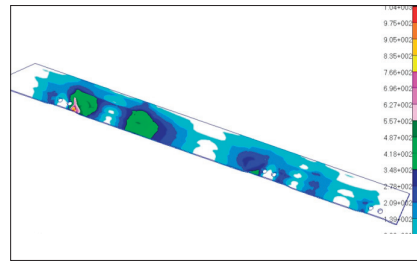


图6 无沟槽气动面应力分布云图
Fig.6 Stress distribution diagram of aerodynamic surface without grooves

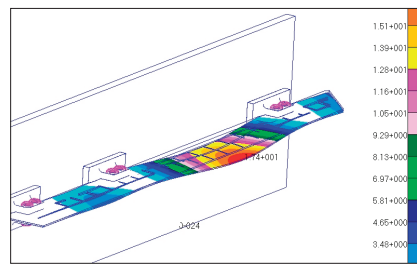


图7 单面沟槽气动面变形分布云图
Fig.7 Deformation distribution diagram of aerodynamic surface without one side grooves

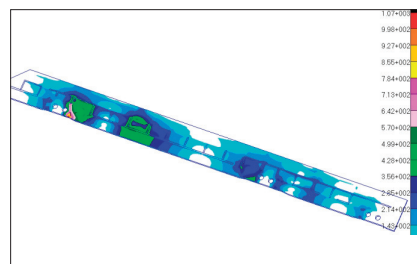


图8 单面沟槽气动面应力分布云图
Fig.8 Stress distribution diagram of aerodynamic surface without one side grooves

制面及气动面的影响,对产品进行静力强度加载试验,为了得到更多的对比数据,在静力试验过程中对试验件上粘贴应变片来获取产品的应力数据,应变片位置根据数值仿真结果判断出应力梯度及分布较理想位置进行确定。

试验的条件及输入按照产品实际使用条件执行,图 9 为气动面试验件连接图。

3.2 试验数据

表 2、表 3 列出了应变片位置测得产品的应力数值,表 4 列出了气动面的最大变形量数值。

3.3 试验与数值仿真数据对比

表 5~7 给出了产品最大应力、变形量试验值与数值仿真结果的对比。

经过数值对比分析,认为由仿真得到的数值是可信的,对于数值存在一定的差异,原因主要有以下 2 点:



图9 试验件连接图

Fig.9 Connection diagram of experiment

表2 控制面应力值

试验项目	载荷级	Mises 应力 /MPa
无沟槽产品	P^{90}	609
单面沟槽产品	P^{90}	614
双面沟槽产品	P^{90}	586

表3 气动面应力值

试验项目	载荷级	Mises 应力 /MPa
无沟槽产品	P^{90} 1	574
	P^{90} 2	271
单面沟槽产品	P^{90} 1	613
	P^{90} 2	282
双面沟槽产品	P^{90} 1	603
	P^{90} 2	276

表4 气动面变形量

试验项目	变形量 /mm
无沟槽产品	14
单面沟槽产品	16
双面沟槽产品	15

表5 控制面应力数值对比

数值	无沟槽	单面沟槽	双面沟槽
计算值	563	623	632
试验值	609	614	586

表6 气动面应力数值对比

数值	无沟槽		单面沟槽		双面沟槽	
	位置 1	位置 2	位置 1	位置 2	位置 1	位置 2
计算值	574	271	613	282	603	276
试验值	542~596	246~281	550~605	284~319	554~608	285~321

(1) 应力试验值由应变片测得。由于应变片测试最终给出的结果是应变片覆盖区域内的应力均值,而计算值为某一点的精确值。从这个角度而言,粘贴应变片区域为同一应力梯度区域效果最佳。但是应变片本身

表7 气动面最大变形数值对比

结果	单面沟槽		双面沟槽	
	最大值	无沟槽相差 /%	最大值	无沟槽相差 /%
试验结果	14	14.3	15	7.16
计算结果	16.6	4.82	16.8	1.20

有一定大小,这就造成了一个应变片测试范围里可能包含了多个应力梯度区域(图 10),得到的测量值应该小于实际情况的最大值,因此有可能存在数值上的一定差距;

(2) 数值仿真并不能完全模拟真实的试验及使用情况,实际情况中存在接触、间隙等问题数值仿真难以精确模拟。

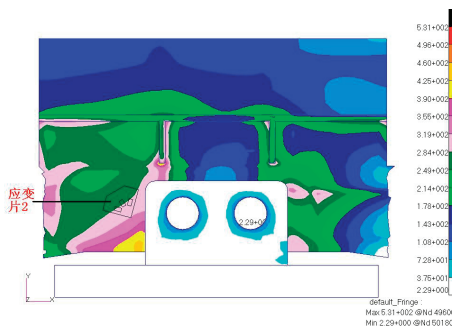


图10 应变片位置应力梯度

Fig.10 Stress gradient distribution

4 结论

通过有限元数值计算及静力强度试验可以得到以下结论:

小型钛合金超塑成型 / 扩散连接气动面表面沟槽对其强刚度有影响,相比没有表面沟槽的产品,最大应力值增大 1%~6% 左右,变形量增加约 5%~14% 左右,可以认为钛合金超塑成型 / 扩散连接气动面强度对沟槽并不敏感,表面沟槽对产品刚度有一定影响。

参考文献

[1] 姚利兵,刘献伟,张鹏,等. 高强度钛合金导弹舵翼面设计制造技术[J]. 航空制造技术,2013(12):102-103.
 YAO Libing, LIU Xianwei, ZHANG Peng, et al. Design and manufacture technology of high-strength titanium alloy rudder and wing on missile[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(12):102-103.
 [2] 李志强,郭和平. 超塑成型 / 扩散连接技术在航空航天工业中的应用[C]// 2004 航空航天焊接国际论坛论文集. 中国机械工程师学会,2004.

LI Zhiqiang, GUO Heping. The superplastic forming/diffusion bonding technology application in the aerospace industry [C]// Proceedings of 2004

(下转第99页)