

几何参数对 SPF/DB 三层结构表面质量的影响研究

杜立华^{1,2,3}, 张兴振^{1,2,3}, 韩晓宁^{1,2,3}, 邵杰^{1,2,3}, 李卫东⁴

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;
2. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024;
3. 数字化塑性成形技术及装备北京市重点实验室, 北京 100024;
4. 北京航空航天大学, 北京 100191)

[摘要] 以 3 层 SPF/DB 钛合金空心桁架结构为研究对象, 通过平面应变有限元模型, 研究了空心结构几何参数对超塑成形过程应力应变分布的影响以及与表面褶皱产生的关系, 并进行了试验验证, 得到了满足超塑成形工艺要求的参数调控范围, 为 3 层 SPF/DB 空心结构设计提供依据。

关键词: SPF/DB; 空心结构; 几何参数; 表面质量; 有限元仿真

Influence of Geometric Parameters on Surface Quality of SPF/DB Hollow Structure

DU Lihua^{1,2,3}, ZHANG Xingzhen^{1,2,3}, HAN Xiaoning^{1,2,3}, SHAO Jie^{1,2,3}, LI Weidong⁴

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technologies, Beijing 100024, China;
3. Beijing Key Laboratory of Digital Plasticity Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China;
4. Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Influence of geometric parameters on the stress and strain distribution and the occurrence of surface groove during superplastic forming is simulated based on a plane strain model for three-sheet titanium SPF/DB hollow truss structure. Parameter ranges satisfying superplastic forming process requirement are obtained after experimental verification, providing a basic for design of three-sheet SPF/DB hollow structure.

Keywords: SPF/DB; Hollow structure; Geometric parameter; Surface quality; Finite element simulation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.10.100

超塑成形 / 扩散连接 (SPF/DB) 是一种用于制造大型、整体轻量化结构的净尺寸先进制造技术^[1-2]。利用 SPF/DB 技术可实现钛合金等具备超塑性材料的单层、双层、3 层和 4 层空心结构的制造, 具有明显的减重效益^[3]。其中钛合金 SPF/DB 3 层结构由于设计自由度大、承载效率高、结构整体性好, 在航空、航天等领域的应用不断扩大, 如空心叶片、进气道唇口、飞机翼盒等零件, 对飞机、航空发动机以及导弹等航天器的设计和制造具有重要意义^[4]。

蒙皮表面褶皱作为影响 SPF/DB 3 层结构成形质量的主要问题之一, 与结构参数、成形工艺参数和材料力学性能密切相关, 通过材料选择、结构或工艺优化设计等方式提高 SPF/DB 3 层结构成形质量是该类结构件设计和制造中必须考虑的内容。Cheng 等^[5]通过有限元模拟方法分析了 SPF/DB 3 层结构表面褶皱的产生过

程, 从成形工艺和结构上提出了抑制表面褶皱的方法; Hefti^[6]将细晶 Ti-6Al-4V 合金应用于 SPF/DB 结构内层板, 避免了表面褶皱的产生, 并应用于飞机热防护结构的制造; 韩晓宁等^[7]基于工程经验, 提出了 SPF/DB 3 层筒形结构的参数设计经验准则。目前, 通过有限元模拟的方法研究 SPF/DB 结构成形过程, 进而优化工艺、提高质量, 已成为国内外学者解决该类结构成形问题的重要途径^[8-10]。

本文以典型平板 SPF/DB 3 层结构为研究对象, 通过模拟和试验相结合的方法, 分析表面褶皱的成因以及结构几何参数对成形后表面质量的影响规律, 旨在为建立 3 层结构设计和成形工艺设计提供基础支持。

1 有限元模型的建立

典型 SPF/DB 3 层结构如图 1 (a) 所示, 其截面中

的主要几何参数包括：蒙皮厚度 T_1 、芯板厚度 T_2 、瓦楞角度 θ 、扩散连接宽度 d ，如图 1 (b) 所示。

本文有限元模型选取结构参数如表 1 所示；考虑对称性，本文取某 3 层结构典型截面，建立相应的平面应变 1/2 几何模型，如图 2 所示。对两侧蒙皮与芯板的扩散连接位置建立绑定约束，选取典型 3 层空心结构成形模具横截面作为成形限制条件，设置两侧蒙皮与模具之间的接触为罚函数接触类型。

通过在内部空腔各个面上施加均匀气压载荷，实现结构吹胀模拟，载荷曲线如图 3 所示。选取成形温度 910°C ，通过材料超塑拉伸试验获得真实应力 - 应变数据，采用粘塑性本构模型描述材料的超塑变形行为，取应力单位为 MPa，应变速率单位 s^{-1} ，拟合试验数据，求得该成形温度下本构方程的各参数值。

$$\sigma = K\varepsilon^m \dot{\varepsilon}^n \quad (1)$$

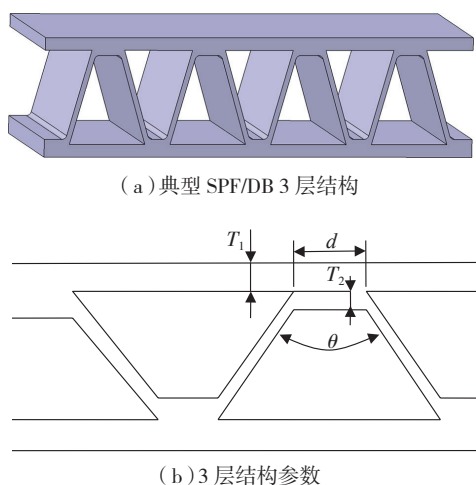


图1 SPF/DB 3层结构几何参数

Fig.1 Geometric parameters of SPF/DB three-sheet structure

表1 结构参数选取

蒙皮厚度 T_1 / mm	芯板厚度 T_2 / mm	瓦楞角度 θ / ($^\circ$)	扩散连接宽度 d /mm
0.5	0.5	60	2
1			
1.5		90	
2.0			

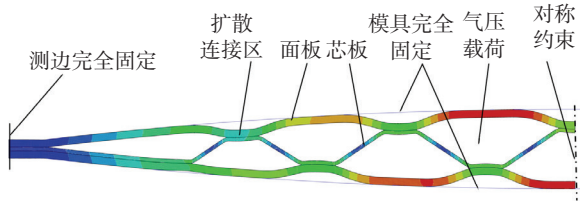


图2 平面应变模型

Fig.2 Plane strain model

其中，材料常数 K 为 802.22，应变速率敏感指数 m 为 0.4826，应变硬化指数 n 为 0.0983。

2 有限元模拟分析

2.1 应力应变分析

图 4 为结构 ($T_1=1.5$ 、 $\theta=90^\circ$) 气压加载完成时刻的应力应变分布图。可知，芯板的应力整体高于蒙皮，应力较大的区域主要集中在蒙皮芯板扩散连接处的外表面以及芯板靠近扩散连接处，一般称为“三角区”。蒙皮的变形几乎为零，变形主要集中在芯板，芯板的整体应变分布均匀，但在三角区存在应变集中情况，该处芯板发生局部减薄。

2.2 表面褶皱产生的原因分析

3 层结构超塑成形的过程如图 5 所示，在成形初始，由于扩散连接区蒙皮是在芯板的“拉扯”作用下胀形，而非扩散连接区蒙皮属于自由胀形，导致两处蒙皮的胀形速率存在差异，如图 5 (a) 所示；随着结构成形的发展，非扩散连接区蒙皮中部首先贴模，如图 5 (b) 所示。此时，若扩散连接区蒙皮与模具内型面间隙较小，随着成形的进行，非扩散连接区蒙皮贴模面积不断扩展，扩散连接区蒙皮也更加接近模具型面，最终可通过少量塑

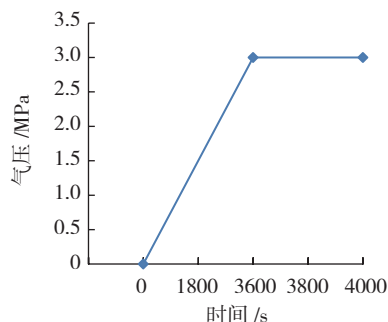
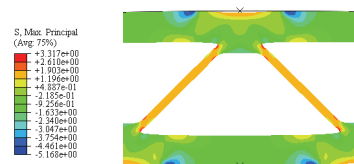


图3 气压加载曲线

Fig.3 Air pressure curve of SPF



(a) 应力分布



(b) 应变分布

图4 超塑成形过程应力应变分布

Fig.4 Stress and strain distribution during SPF

性变形实现全部蒙皮贴模,如图 5 (c) 所示。成形后零件表面光滑无褶皱,如图 6 (a) 所示。若在图 5 (b) 所示时刻,扩散连接区蒙皮与模具内型面间隙较大,则随着成形进行,非扩散连接区蒙皮贴模面积的扩展使得在扩散连接区附近“存储”了大量的待成形材料,但可贴模面积却相对不足,最终扩散连接区蒙皮无法完全贴模而形成表面褶皱,如图 6 (b) 所示。褶皱的严重程度用褶皱深度表征,褶皱深度越大,表明成形表面质量越差。

2.3 几何参数与褶皱深度的关系

图 7 为依据表 1 中几何参数进行成形过程有限元模拟获得的褶皱深度结果。可以看出,随着外蒙皮厚度 T_1 的增大以及瓦楞角度 θ 的增加,褶皱的深度逐渐减小。当 $T_1 \geq 2\text{mm}$ 且 $\theta \geq 60^\circ$ 以及当 $T_1 \geq 1.5\text{mm}$ 且 $\theta \geq 90^\circ$ 时,成形结构表面均未出现褶皱。

3 几何参数对褶皱影响的理论分析

以一个扩散连接区域局部为例,对其受力情况进行分析,如图 8 所示。

由气体吹胀成形的特点,空腔内部气体对蒙皮施加均匀压力 P (扩散连接区施加于芯板内表面),蒙皮受压向外胀形,通过扩散连接区对未扩散连接的芯板施加拉力,使其拉起、伸长形成立筋。由牛顿第三定律,立筋对扩散连接区产生反向拉力 F_m 。 F_m 的作用使扩散连接区后续变形受到阻碍,该区蒙皮胀形速率将慢于两侧相邻的自由蒙皮,该速率差使得扩散连接区域将承受来自两侧蒙皮的弯矩 T_p 和使其向外变形的作用力 F_p 。

因此,在吹胀变形的方向,扩散连接区所受的合力 F_Σ 为:

$$F_\Sigma = F_{p\text{合}} + pd - 2F_m \cos \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

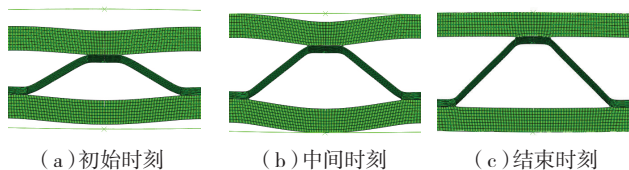


图5 超塑成形不同阶段结构形态

Fig.5 Structure configurations at different moment during SPF

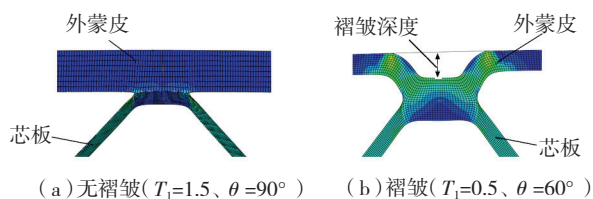


图6 成形模拟结果

Fig.6 Simulating results of surface quality

式中, $F_{p\text{合}}$ 为两侧蒙皮对扩散连接区作用力 F_p 的合力, p 为吹胀气压, d 为扩散连接宽度, θ 为该变形时刻相邻立筋间的夹角。

根据式(1)和式(2),可知蒙皮厚度、瓦楞角度对褶皱缺陷的影响主要为:

(1) 蒙皮厚度增大,使得 $F_{p\text{合}}$ 增大,扩散连接区与非扩散连接区的胀形速率差减小,表面褶皱越不容易产生;

(2) 瓦楞角度增大,中间成形过程中 F_m 在吹胀方向的合力减小,立筋变形速度变慢,反向拉力 F_m 减小,扩散连接区与非扩散连接区的胀形速率差减小,表面褶皱越不容易产生。

4 典型件成形试验验证

选取两组典型几何参数 ($T_1=1.5\text{mm}/T_2=0.5\text{mm}/\theta=60^\circ/d=2$ 和 $T_1=1.5\text{mm}/T_2=0.5\text{mm}/\theta=90^\circ/d=2\text{mm}$) 进行超塑成形工艺验证试验,主要工序步骤为下料-酸洗-图形制备-封焊-扩散连接-超塑成形。试验完成后,通过剖切截面测量实际成形瓦楞角度和表面褶皱深度,检查结构成形符合性。

剖切后的试验件如图 9 所示,由试验结果可知 60° 瓦楞角度情况下试验件表面出现目视可见的褶皱, 90° 瓦楞角度情况下成形后试验件为光滑表面。试验结果与有限元模拟结果一致。

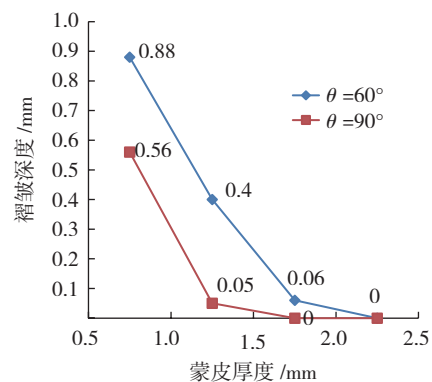


图7 几何参数对褶皱深度的影响

Fig.7 Influence of geometry parameters on groove depth

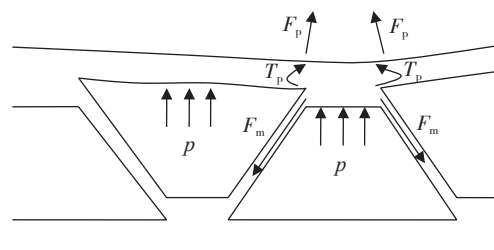


图8 扩散连接区受力分析

Fig.8 Force distribution at DB area

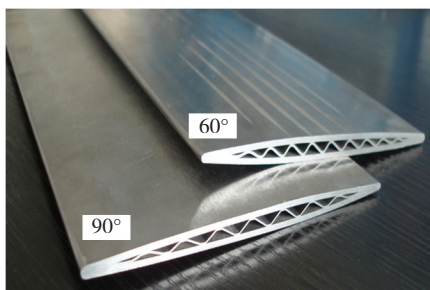


图9 试验件剖面
Fig.9 Section of test pieces

5 结论

(1) 典型 SPF/DB 3 层空心结构平面应变有限元模型的模拟结果与试验结果基本吻合,可以用于指导 3 层空心结构参数设计。

(2) 瓦楞角度、蒙皮 / 芯板厚度对比对成形后表面褶皱有显著影响,结构设计时应重点考虑。

(3) 从超塑成形工艺性的角度考虑,提出 3 层空心结构参数设计准则: 当瓦楞角度较大($\geq 90^\circ$)时,宜选择蒙皮 / 芯板厚度配比 ≥ 3 ; 当瓦楞角度较小($60^\circ \sim 90^\circ$)时,宜选择蒙皮 / 芯板厚度配比 ≥ 4 ,此时不易产生表面褶皱。

参考文献

- [1] 李志强, 郭和平. 超塑成形 / 扩散连接技术在航空航天工业中的应用 [J]. 锻压技术, 2005(1): 79-81.
- [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, 53(8): 32-35.
- [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, 53(8): 32-35.
- [4] 曾元松. 航空钣金成形技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- [5] ZENG Yuansong. Technology of aeronautical sheet metal forming[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.
- [6] 邵杰, 韩秀全, 韩晓宁, 等. SPF/DB 设计与制造一体化技术在导弹中的应用 [J]. 航空制造技术, 2009, 52(10): 71-72.
- [7] SHAO Jie, HAN Xiuquan, HAN Xiaoning, et al. Application of structural optimization design and manufacture technology in missile[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(10): 71-72.
- [8] CHENG J H, LEE S. Methods for resolving grooving problems in parts manufactured from combined diffusion bonding and superplastic forming processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994(45): 249-254.
- [9] HEFTI L D. Innovations in the superplastic forming and diffusion

bonded process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008(17): 178-182.

[7] 韩晓宁, 邵杰, 白雪飘, 等. SPF/DB 三层筒形回转结构设计及承载分析研究 [J]. 航空制造技术, 2013, 56(16): 168-171.

HAN Xiaoning, SHAO Jie, BAI Xuepiao, et al. Research on design and analysis of SPF/DB three sheet tubular structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(16): 168-171.

[8] ZHAO B, LI Z Q, HOU H L, et al. Three dimensional FEM simulation of titanium hollow blade forming process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010(6): 963-968.

[9] YOON J H, LEE H S, YI Y M. Finite element simulation on superplastic blow forming of diffusion bonded 4 sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008 (1): 68-72.

[10] 黄钢华, 张益华, 门向南, 等. 钛合金超塑成形 / 扩散连接的数值模拟及工艺研究 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2009(3): 16-19, 35.

HUANG Ganghua, ZHANG Yihua, MEN Xiangnan, et al. Numerical simulation and technical study of superplastic forming and diffusion bonding of Ti alloy sheet[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2009(3): 16-19, 35.

通讯作者: 邵杰, 研究员, 研究方向为超塑成形 / 扩散连接技术, E-mail: shaojie201309@126.com.

(责编 铃兰)

(上接第93页)

YANG Wanjun, SHI Rongming. Research on the confirmation method of vibration fatigue experiment life[J]. Machine Design and Research, 2012, 28(2): 71-73.

[8] 任军, 张庆余, 朱畅. 航空发动机设计中的高周疲劳问题 [J]. 科技传播, 2014(2): 36-37.

REN Jun, ZHANG Qinyu, ZHU Chang. High cycle fatigue problems on aircraft engine design[J]. Science and Technology Communication, 2014(2): 36-37.

[9] 李静, 孙强, 李春旺, 等. 某型航空发动机压气机叶片振动疲劳寿命研究 [J]. 应用力学学报, 2001, 28(2): 189-190.

LI Jing, SUN Qiang, LI Chunwang, et al. Study on the vibration fatigue life for aero-engine compressor blade[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 28(2): 189-190.

[10] 张伟刚, 梁龙彬, 赵启大, 等. 光纤光栅与电阻应变片应变测量的对比分析 [J]. 传感技术学报, 2001, 9(3): 200-205.

ZHANG Weigang, LIANG Longbin, ZHAO Qida, et al. Contrast analyses of strain measurement of fiber grating and resistance strain chip[J]. Journal of Sensing Technology, 2001, 9(3): 200-205.

[11] 德国 m+p 国际公司. Vibcontrol 振动控制分析系统 2.10 版操作手册 [M]. 北京: 德国 m+p 国际公司北京代表处, 2012.

German m+p International Corporation. Vibcontrol vibration control analysis system 2.10 edition of the operating manual[M]. Beijing: Beijing Office of German m+p International Corporation, 2012.

通讯作者: 吴琼, 工程师, 研究方向为振动疲劳, E-mail: 371977922@qq.com.

(责编 李丹)