

# 热压弯成形工艺下的高筋蒙皮结构优化研究

薛文彬,陈明和,谢兰生

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**运用有限元软件 ABAQUS/Explicit 对蒙皮的热压弯成形进行数值仿真,模拟其热压弯成形的过程,研究高筋蒙皮的筋高、横向筋条筋宽及纵向筋条筋间距对横向筋条失稳和高筋蒙皮质量的影响。采用田口正交试验法进行热压弯成形仿真试验,对试验结果进行极差和方差分析,综合评估蒙皮的筋宽、筋高、筋条间距对热压成形后高筋蒙皮质量的影响和筋条失稳情况,得到最优的结构参数组合。

**关键词:**高筋蒙皮;热压弯成形;结构优化;数值仿真;田口正交试验

**中图分类号:**TG306 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0027-03

## Reserch on Structural Optimization of High Rib Skin in Thermal Forming

XUE Wenbin, CHEN Minghe, XIE Lansheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The finite element software ABAQUS / Explicit was applied to conduct numerical simulation on the hot bending process of the skin. The effects of the height of the ribs, the width of the transverse ribs and the spacing of the longitudinal ribs on the instability of the transverse ribs and the skin quality were studied. The Taguchi orthogonal test method was used to carry out hot press bending simulation test, and the range and variance analysis of the test results were conducted to comprehensively evaluate the influence of rib width, height and spacing on the quality of high rib skin and rib instability after hot press forming, thus the optimal combination of structural parameters being obtained.

**Keywords:** high rib skin; hot bending; structure optimization; numerical simulation; Taguchi orthogonal test

## 0 引言

高筋蒙皮由于质量轻、刚度高在运载火箭、导弹外壳上得到了广泛的使用<sup>[1]</sup>,其特点是蒙皮和加强筋相结合组成一个整体。由于其结构复杂、外形精度高、推重比大等需求,轻量化、高精度成为高筋蒙皮制造研究的重点。热压弯成形是一种传统的高筋蒙皮成形工艺,具有加工成本低、周期短、适应不同轮廓<sup>[2]</sup>等优点,但容易导致筋条扭曲、失稳等成形缺陷。高筋蒙皮筋条的失稳会使构件的可靠性大幅降低,严重时会导致成形件的报废<sup>[3]</sup>。针对筋条失稳的问题,研究人员通常采用改变蒙皮成形的工艺方法进行优化<sup>[4]</sup>,但尚无学者对高筋蒙皮筋条的结构进行研究和分析。

本文通过 ABAQUS/Explicit 软件模拟 5A06 铝合金高筋蒙皮的热压弯成形过程,针对蒙皮的整体质量和横向筋条的屈曲失稳问题进行优化研究。采用田口正交试验法进行热压弯成形仿真试验,并对试验结果进行极差和方差的分析,综合评估高筋蒙皮横向筋条的筋宽、筋高、纵向筋条的筋条间距对零件质量和横向筋条失稳的影响<sup>[5]</sup>,得出较优的结构参数组合,指导实际制造过程的热压弯成形试验。本文的试验方案流程如图 1 所示。

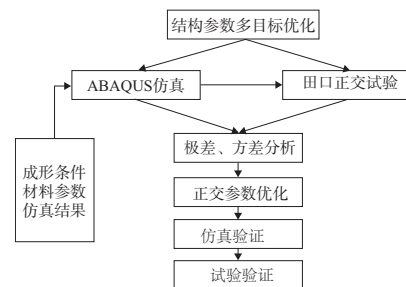


图 1 基于 ABAQUS 方差分析的热压弯成形正交参数优化流程

## 1 试验材料与方法

### 1.1 高筋蒙皮热压成形工艺仿真

本文以 5A06 铝合金高筋蒙皮为研究对象,采用 ABAQUS/Explicit 模拟分析高筋蒙皮热压弯成形的过程。数值模拟前需要简化,忽略模具热胀的影响,成形是在恒温条件下进行,无热交换的影响,材料成形参数用材料相应温度的性能来表征。试验材料为一块如图 2(a)所示的 400 mm×270 mm×28 mm 的热轧态 5A06 铝合金高筋壁板。

第一作者简介:薛文彬(1996—),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为计算机辅助塑性成形。

根据 5A06 铝合金高温拉伸试验结果可知,5A06 铝合金在温度为 300℃~450℃ 时呈现良好的变形能力<sup>[6]</sup>,且变形抗力较小。运用 ABAQUS/Explicit 软件,建立与试验件尺寸相同的有限元模拟对象,如图 2(b) 所示。采用实体单元 C3D8R 对壁板毛坯进行划分,设置网格化边长为 2 mm;上下模视为刚体,提取模具表面,采用刚体单元 R3D4 进行划分。5A06 铝合金在 400℃ 高温条件下的应力-应变曲线如图 3 所示,材料的密度为 2.7 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量约为 72 GPa,泊松比为 0.3<sup>[7]</sup>。

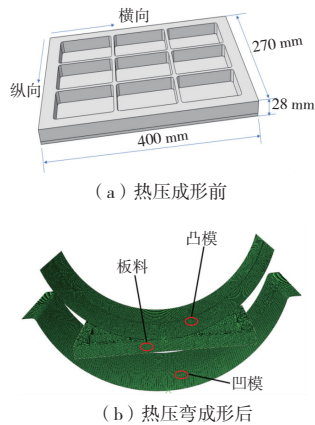


图 2 高筋蒙皮热压成形前后的结构件有限元模型

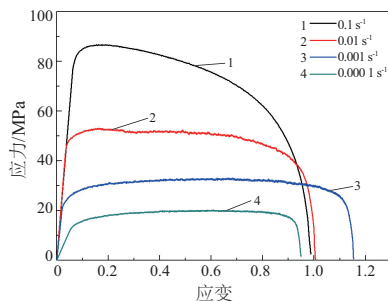


图 3 5A06 铝合金 400℃ 下的应力-应变曲线

## 1.2 田口正交试验

结合生产实际,本文以成形构件的质量作为目标函数 1,以横向筋条纵向位移所表征的横向筋条起皱情况作为目标函数 2。选择横向筋宽、筋高和纵向筋间距作为影响零件质量和成形精度的潜在因素,每个参数选取 4 个水平,采用田口正交表  $L_{16}(4^3)$  设计并进行仿真试验。纵向筋条的宽度固定为 6 mm,筋高选择 16~25 mm,横向筋宽选择 2~8 mm,纵向筋间距取 50~200 mm。蒙皮筋条结构参数水平如表 1 所示,田口正交试验安排及对应的成形零件质量和横向筋条切向应力如表 2 所示。

表 1 筋条结构参数及水平 单位:mm

水平	筋高	横向筋宽	纵向筋间距
1	16	2	50
2	19	4	100
3	22	6	150
4	25	8	200

表 2 热压成形正交试验及仿真结果

编号	筋高/mm	横向筋宽/mm	纵向筋间距/mm	最大纵向位移/mm	质量/kg
1	16	2	50	4.423 0	4.873 9
2	16	4	100	0.790 0	4.932 3
3	16	6	150	0.743 0	4.990 8
4	16	8	200	0.774 0	5.049 2
5	19	2	100	5.532 0	4.256 9
6	19	4	150	0.748 2	4.326 3
7	19	6	200	0.791 2	4.395 6
8	19	8	50	0.731 3	4.465 0
9	22	2	150	7.152 0	3.639 9
10	22	4	200	0.960 1	3.720 2
11	22	6	50	0.796 8	3.800 5
12	22	8	100	0.857 6	3.880 8
13	25	2	200	7.272 0	3.022 9
14	25	4	50	0.808 4	3.114 1
15	25	6	100	1.358 0	3.205 4
16	25	8	150	2.188 0	3.296 6

## 1.3 极差分析与方差分析

以  $\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}_3, \bar{T}_4$  分别表示 4 个水平的试验结果的平均值,计算各参数 4 个水平试验结果的极差。极差越大,表明参数的 4 个水平对指标造成的差别越大。可通过极差的大小来判断参数对指标的影响顺序。为区分试验中由于结构改变引起的成形最大纵向位移所造成的差异,需精确地定量估计各参数对成形质量的影响<sup>[8]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 仿真结果云图

对 16 组结构参数由 ABAQUS/Explicit 计算得到高筋蒙皮成形的横向筋条纵向位移,仿真试验结果如表 2 所示。16 组试验中,第 8 组的最大纵向位移最小,纵向位移主要发生在外部边框处,为 0.731 3 mm,对应的筋高为 19 mm,横向筋宽为 8 mm,纵向筋间距为 50 mm。这说明在该结构参数下横向筋条失稳的可能性最小。第 13 组的质量最小,为 3.022 9 kg,其中横向筋条的最大纵向位移为 7.272 mm,横向筋条发生起皱的现象(图 4)。

### 2.2 蒙皮结构参数对筋条失稳和蒙皮质量的影响规律

从表 2 所得到的试验数据中分析各结构参数对横向筋条纵向位移和蒙皮质量的影响。表 3 和表 4 分别为横向筋条纵向位移和质量的极差分析结果,极差值越大代表所占的影响因素越大。在筋条纵向位移极差分析中,结构参数对横向筋条纵向最大位移影响程度:横向筋宽>筋条高度>纵向筋间距。在高筋蒙皮质量极差分析中,结构参数对高筋蒙皮质量影响程度为筋条高度>横向筋宽>纵向筋间距。

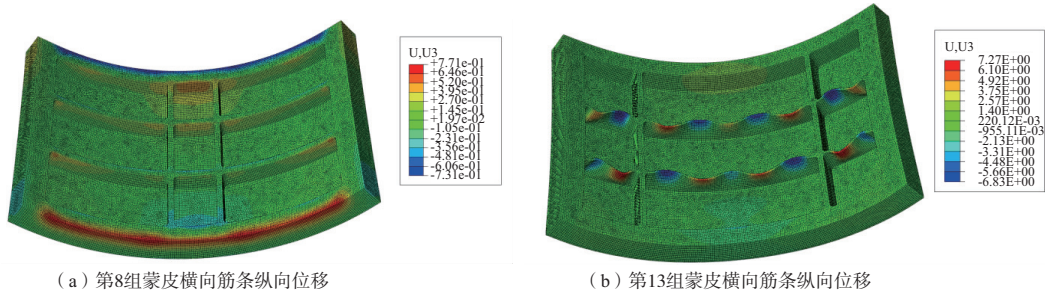


图4 高筋蒙皮纵向位移云图

表3 横向筋条纵向位移极差分析

项目	平均值				极差值	排序
	$\bar{T}_1$	$\bar{T}_2$	$\bar{T}_3$	$\bar{T}_4$		
筋高 $A/mm$	1.682 5	1.950 7	2.441 6	2.906 6	1.224 1	2
横向筋宽 $B/mm$	6.095 0	0.826 7	0.922 3	1.137 7	5.268 3	1
纵向筋间距 $C/mm$	1.689 9	2.134 4	2.707 8	2.449 3	1.017 9	3

表4 高筋蒙皮质量极差分析

项目	平均值				极差值	排序
	$\bar{T}_1$	$\bar{T}_2$	$\bar{T}_3$	$\bar{T}_4$		
筋高 $A/mm$	4.961 6	4.360 9	3.760 3	3.169 8	1.791 8	1
横向筋宽 $B/mm$	3.948 4	4.023 2	4.098 1	4.172 8	0.224 4	2
纵向筋间距 $C/mm$	4.063 4	4.068 9	4.063 4	4.046 9	0.022 0	3

### 2.3 正交参数优化

采用田口正交实验法,不考虑各因素之间的交互作用,通过2.2节得出不同结构相应影响因素主次顺序可以得出一个较优的结构参数组合。

根据表3可知,筋高  $A$  对蒙皮质量的影响最为显著,由2.2极差分析出最优工艺参数为  $A(\bar{T}_4)$ ,对横向筋条纵向位移影响排在第2位,最优工艺参数为  $A(\bar{T}_1)$ 。由多数

倾向原则,结构参数选择  $A(\bar{T}_4)$ ,即筋高取 25 mm。

根据表4可知,横向筋宽  $B$  对横向筋条纵向位移影响最为显著,由2.2极差分析出最优的工艺参数为  $\bar{T}_2$ ,对蒙皮质量的影响排在第2位,最优工艺参数为  $B(\bar{T}_1)$ 。根据多数倾向原则,综合考虑结构参数选择  $B(\bar{T}_2)$ ,即横向筋宽取 4 mm。

纵向筋间距对横向筋条纵向位移的影响和蒙皮质量的影响均不大,纵向筋间距对蒙皮的质量无影响。根据横向筋宽最小位移原则得到最优的纵向筋间距为  $C(\bar{T}_1)$ ,取纵向筋条筋间距为 50 mm。

综上考虑较优的结构参数组合为  $A(\bar{T}_4)$ 、 $B(\bar{T}_2)$ 、 $C(\bar{T}_1)$ ,即筋高取 25 mm,筋宽取 4 mm,纵向筋间距取 50 mm。

### 2.4 试验验证及结果分析

根据模拟仿真得到的优化参数,对 5A06 铝合金高筋蒙皮进行热压弯成形试验,模拟结果如图5所示。图5(a)为筋高 16 mm、筋宽 2 mm、横向筋间距 50 mm 的仿真结果图,横向筋条出现了明显的起皱现象,可以看出失稳情况的发生,质量为 4.873 9 kg;图5(b)为优化后的高筋蒙皮,筋条的横向位移在 1 mm 之内且变形区域主要集中在外轮廓,筋条未发生失稳的情况,质量为 3.114 1 kg。优化后的高筋蒙皮结构相较于优化前的结构失稳风险显著降低,质量减轻 36.1%。

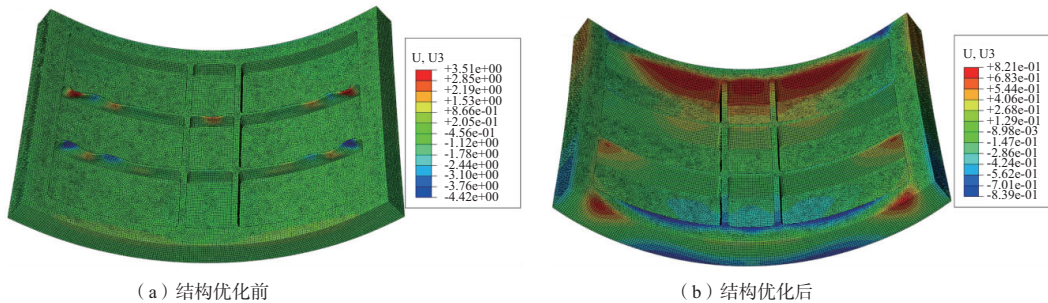


图5 热压弯成形模拟结果

(下转第 51 页)

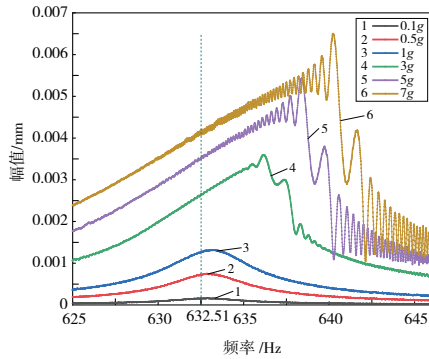


图 11 纬向两端固支平板逆向扫频结果

观察图 8-图 11 所示的测试结果发现:1) 经、纬向 2.5 维树脂基编织复合材料两端固支平板在低幅值水平激励下,其强迫振动响应均呈线性振动的特点,并且共振频率变化很小;2) 经向 2.5 维编织树脂基复合材料两端固支平板的测试结果揭示了刚度“软化”现象,其在高幅值水平激励条件下还发生了显著的振幅突升/突降的“跳跃”现象;3) 纬向 2.5 维树脂基编织复合材料两端固支平板的测试结果揭示了非常显著的刚度“硬化”现象和振幅“跳跃”现象;4) 在两端固支约束条件下,整个 2.5 维树脂基编织复合材料平板的基础激励扫频试验过程中并未观察到肉眼可辨的振幅过大现象。由此可排除由于大变形引发的几何非线性因素的影响。

### 3 结语

采用两端固支约束平板的基础激励扫频振动测试避免了因材料结构大变形引起的几何非线性因素影响,能够

准确揭示 2.5 维纬向树脂基编织复合材料平板试验件在高水平幅值基础激励、微幅变形条件下的振动非线性特征,包括材料的变刚度特性(刚度软化/刚度硬化)和非线性振动的振幅“跳跃”现象。通常复合材料的基体材料都具有非线性黏弹性性质,同时复合材料结构非主拉伸方向内剪应力-应变呈非线性关系。因而在微幅变形条件下,复合材料的宏观强迫振动特性也呈现非线性特征。本文开展的 2.5 维纬向树脂基编织复合材料平板的基础激励扫频振动试验研究工作,可为今后振动非线性特性的理论研究工作提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 宋健. 2.5 维机织复合材料力学行为及寿命预测模型研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [2] 陈建恩. 轻质材料层合板的非线性动力学理论分析与实验研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2013.
- [3] TABIEI A, IVANOV I. Materially and geometrically non-linear woven composite micro-mechanical model with failure for finite element simulations [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2004, 39(2): 175-88.
- [4] AMABILI M, KARAZIS K, KHORSHIDI K. Nonlinear vibrations of rectangular laminated composite plates with different boundary conditions [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2011, 11(4): 673-95.
- [5] PICKARD A. Composite non-linearity in high cycle fatigue experimentation [M]. [S.L.: s.n.], 2014: 183-192.
- [6] 王柱成, 温卫东. 2.5 维机织复合材料冲击剩余强度试验研究 [J]. *机械制造与自动化*, 2020, 49(5): 47-49.
- [7] 陈晶. 陶瓷基复合材料本构模型及振动分析 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.

收稿日期:2021-01-22

(上接第 29 页)

### 3 结语

1) 采用田口正交试验法,以筋高、横向筋条宽度、纵向筋条筋间距为参数,以横向筋条失稳风险和高筋蒙皮的质量为目标构建了高筋蒙皮热压弯成形的仿真试验方案,通过横向筋条纵向位移表征筋条失稳的风险,通过方差分析确定了各结构参数对失稳和质量影响的显著性。

2) 筋高对高筋蒙皮质量的影响较大,增大筋高会有效减轻蒙皮的质量。横向筋条的筋宽对筋条失稳的影响较大,在筋宽 < 2 mm 时筋条极容易发生失稳缺陷。

3) 针对 5A06 铝合金高筋蒙皮的热压弯成形,得到了较好的结构参数组合  $A(\bar{T}_4)$ 、 $B(\bar{T}_1)$ 、 $C(\bar{T}_1)$ ,即筋高取 25 mm,筋宽取 4 mm,纵向筋间距取 50 mm,并通过模拟仿真验证所得参数的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 赵长喜,李继霞. 航天器整体壁板结构制造技术[J]. *航天制造技术*, 2006(4): 44-48.
- [2] 王正超,赵东伟,尹怀仙. 基于近似模型的城市客车车架轻量化

化设计研究[J]. *机械制造与自动化*, 2020, 49(5): 169-171, 187.

- [3] 郝永刚,张志超,祝全超,等. 铝合金带筋板柔性多点模渐进压弯成形工艺仿真与实验[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(11): 12-17.
- [4] 付守冲,杨立军,王扬,等. 5A06 铝合金交叉筋壁板激光诱导自由成形扭曲现象研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(35): 45-51.
- [5] WANG HY, XIE H, CHENG W, et al. Multi-objective optimisation on crashworthiness of front longitudinal beam (FLB) coupled with sheet metal stamping process [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 132: 36-47.
- [6] 欧玲,浦荣,曾方欣,等. 5A06 合金高温塑性变形行为[J]. *锻压技术*, 2018, 43(6): 123-128.
- [7] 秦中环,李保永,韩春岭,等. 5A06 铝合金高筋蒙皮热压成形规律及尺寸精度研究[J]. *锻压技术*, 2020, 45(8): 76-82.
- [8] OLIAEI E, HEIDARI B S, DAVACHI S M, et al. Warpage and shrinkage optimization of injection-molded plastic spoon parts for biodegradable polymers using taguchi, ANOVA and artificial neural network methods [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(8): 710-720.

收稿日期:2021-03-09