

航空发动机钛合金复杂型面零件的热拉深成形工艺

乔旭东¹, 王鹏飞², 陈明和¹, 李春阳², 吴亚凤², 王富明², 冯 栋²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 中航航发动力股份有限公司 钣焊中心, 陕西 西安 710021)

摘要: 针对航空发动机整流罩屏零件的结构特点和拉深减薄问题, 对 TC1 钛合金进行高温成形性能实验, 基于有限元仿真模拟软件 PAMSTAMP, 对 TC1 钛合金零件展开后的坯料进行计算并模拟热拉深成形过程, 将优化的模拟结果用于实际生产。结果表明: 采用 PAMSTAMP 仿真软件可以有效预测零件的拉深缺陷、优化钣金初始坯料和拉深成形工艺路线以及节约试制成本; 在压边力为 30 kN、拉深速度为 $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和摩擦因数为 0.12 的条件下, 采用优化后的对坯料进行 3 次热成形的工艺方案, 可以获得减薄尺寸满足要求的整流罩屏零件。

关键词: TC1 钛合金; 整流罩屏; 热拉深; 减薄; 高温成形性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.009

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0060-07

Hot drawing process on complex profile parts of titanium alloy for aero-engine

Qiao Xudong¹, Wang Pengfei², Chen Minghe¹, Li Chunyang², Wu Yafeng², Wang Fuming², Feng Dong²

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Coin welding Center, Avic Aviation Power Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: For the structural characteristics and the problem of deep drawing thinning for aero-engine fairing screen parts, the high temperature formability experiment of TC1 titanium alloy was carried out, the expanded blank of TC1 titanium alloy TC1 part was calculated, and the hot deep drawing process was simulated based on finite element simulation software PAMSTAMP. Then, the optimized simulation results were used for actual production. The research results show that the finite element simulation software PAMSTAMP can effectively predict the deep drawing defects of part, optimize the initial blank of sheet metal and the process route of deep drawing, save the trial production cost. Under the conditions of the blank holder force of 30 kN, the deep drawing speed of $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and the friction coefficient of 0.12, the fairing screen parts with thinning size meeting the requirements can be obtained by adopting the optimized process scheme that the blank is thermoformed three times.

Key words: TC1 titanium alloy; fairing screen; hot drawing; thinning; high temperature formability

某航空发动机型的整流罩屏零件结构为型面带凸包的复杂钛合金拉深件, 零件型面尺寸精度高, 几何尺寸过渡不均匀, 采用热成形拉深时坯料存在严重的减薄风险^[1-2]。传统的参数试制法存在试制成本高、周期长等缺点, 已不能满足零件交付周期日益缩短的需要。同时, 以往对 TC1 钛合金热成形性能的研究仅停留在高温拉伸方向^[3], 缺乏成形极限性能的探索, 无法建立完整的成形性能数据库, 因此, 研究并发展钛合金复杂曲面零件热拉深新工艺具有迫切的需求^[4-7]。

本文首先对 TC1 钛合金进行高温拉伸和成形极限性能测试并建立数据库, 采用大型仿真模拟软件 Pamstamp 模拟发动机整流罩屏的热拉深工艺, 研究在不同拉深工艺参数条件下, 不同坯料尺寸和工艺路线对坯料厚度减薄的影响, 为消除热拉深过程中的减薄缺陷和制定合理的拉深工艺方案提供理论依据。最终采用坯料 3 次热成形的优化工艺方案, 获得了减薄尺寸满足需求的钛合金零件。

1 高温成形性能实验及有限元模型建立

1.1 TC1 钛合金高温单向拉伸实验

本文研究的 TC1 钛合金为轧制板材, 厚度为 1 mm, 其相变温度约为 925 °C, 选取变形温度为 650、700 和 750 °C, 应变速率为 0.0100、0.0018 和

收稿日期: 2023-02-17; 修订日期: 2023-05-16

作者简介: 乔旭东 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: xdqiao@nuaa.edu.cn

通信作者: 陈明和 (1962-), 男, 博士, 教授

E-mail: meemhchen@nuaa.edu.cn

0.0005 s^{-1} 进行单向拉伸实验。采用深圳瑞格尔公司生产研发的型号 RG2000-20 的微机控制电子万能实验机及自行研制的 PID 自动控制加热炉, 控温精度为 $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 为减小实验误差, 每组实验重复 3 次。

高温拉伸结果如图 1 所示, 从图 1 中可以看出, 当应变速率一定时, 变形温度上升, 流变应力减小。应变速率为 0.0100 s^{-1} 时, 温度上升 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 其

流变应力下降了 $1/3$ 左右。应变速率为 0.0018 和 0.0005 s^{-1} 时, 温度上升 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 流变应力的下降幅度更为明显。这是因为变形温度上升, 晶界扩散激活能增加, 促进更多的滑移系移动, 进而降低了位错阻力。同时, 发现 TC1 钛合金在 $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0.0018 s^{-1} 条件下出现超塑性现象, 显微组织发生动态回复和再结晶现象, 使金属软化, 消除了加工硬化、提高了塑性和降低了变形抗力。

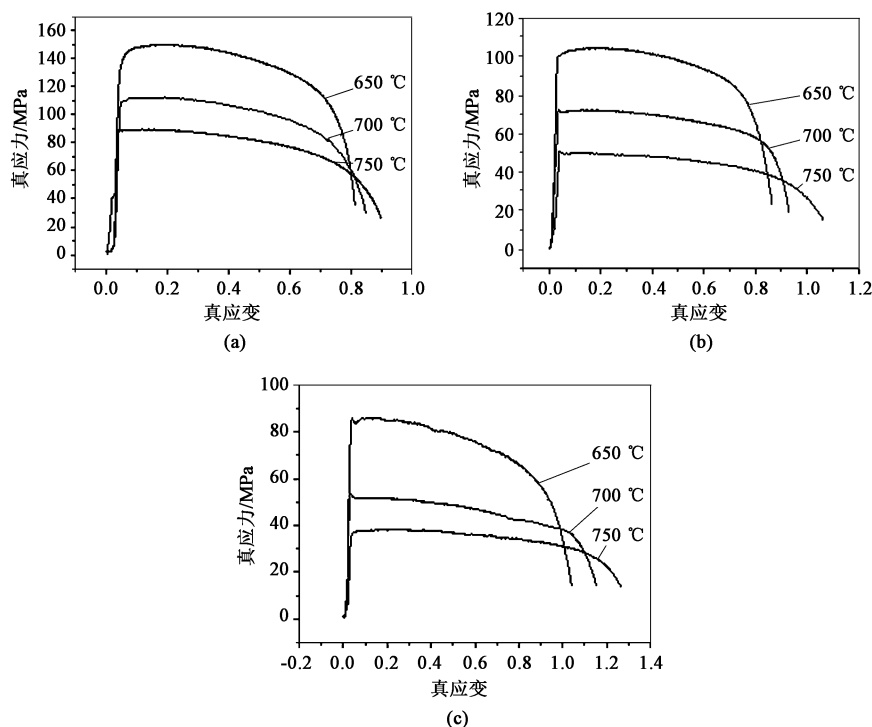


图 1 不同变形条件下 TC1 钛合金板材的真应力-真应变曲线

(a) 0.0100 s^{-1} (b) 0.0018 s^{-1} (c) 0.0005 s^{-1}

Fig. 1 True stress-strain curves of TC1 titanium alloy sheet under different deformation conditions

1.2 成形极限实验

按照 GB/T 24171.2—2009^[8] 设计如图 2 所示的成形极限试样, 通过改变试样宽度来获得不同应变路径下的极限应变, 试样的长度为 160 mm 、宽度为

$22 \sim 160 \text{ mm}$ 。采用电化学腐蚀方法, 在板料表面印制网格。按照 GB/T 15825.2—2008^[9] 选取半球形凸模, 尺寸如图 3a 所示。实验开始前, 在板料和模具表面喷涂氮化硼, 起到防氧化和润滑的作用。

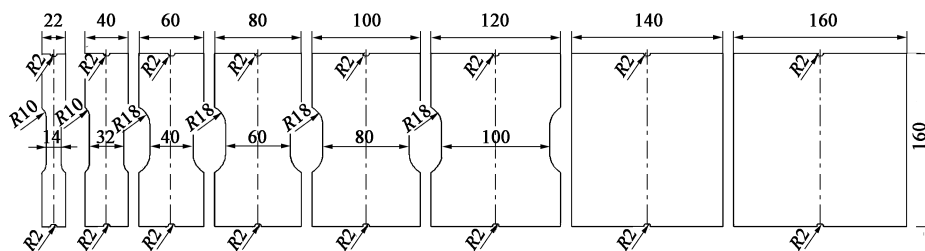


图 2 成形极限试样几何尺寸

Fig. 2 Geometry sizes of forming limit samples

实验机的成形速度一般为 $50 \sim 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 在板料即将破裂时降低速度, 发现板料出现裂纹立

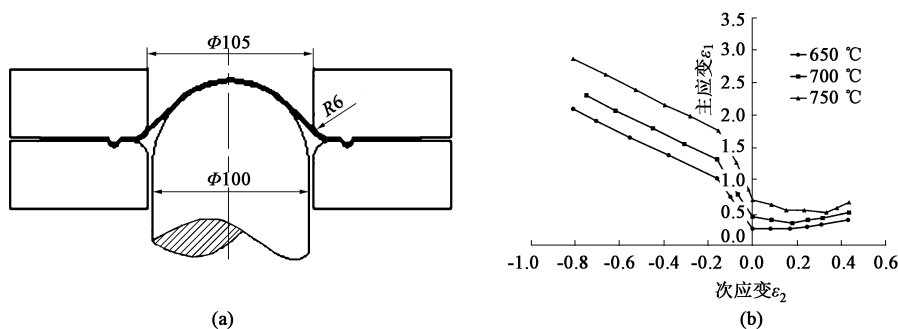


图 3 热拉深模具结构示意图 (a) 和成形极限图 (b)

Fig. 3 Structure schematic diagram of hot drawing die (a) and FLD (b)

即停止。确定材料在高温 650~750 °C 下的基本力学性能和成形极限性能等参数, 图 3b 为实验完成后绘制的成形极限图 (Forming Limit Diagram, FLD)。研究结果同时为后续有限元仿真提供基本参数。

1.3 仿真模型建立

航空发动机整流罩屏零件的结构示意图如图 4 所示, 零件最大外径尺寸大于 $\Phi 196$ mm, 实际拉深高度不小于 155 mm, 加工后的零件最小厚度要求大于 0.65 mm。同时, 该零件型面直径在拉伸成形过程中变化剧烈, 制造难度大, 属于钣金类难加工零件^[10]。

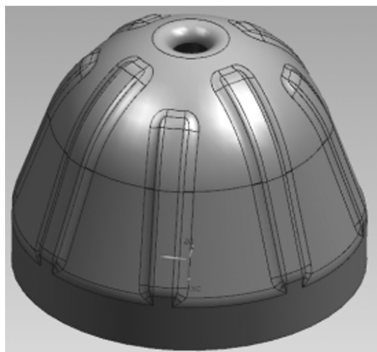


图 4 整流罩屏零件结构示意图

Fig. 4 Structure schematic diagram of fairing screen part

依据零件复杂的结构特点, 初步制定拉深工艺如下: 下料→第 1 次拉深 (预成形, 必要时进行)→第 2 次拉深 (拉深型面)→钻孔 (顶部)→第 3 次拉深 (拉深凸筋)→检验。设计 3 次拉深模具的三维模型如图 5 所示, 该模具由凸模、凹模和压边圈组成。第 1 次拉深时, 将坯料放置在压边圈上, 然后凹模以 $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度下行与坯料接触, 并与压边圈一起将坯料压紧, 压边力为 30 kN, 最后坯料在压边圈和凹模的共同作用下向凸模闭合。模拟时, 模具与材料摩擦因数选择系统默认值, 为 0.12, 模具闭合间隙设置为材料厚度的 1.1 倍, 即 1.1 mm。

1.4 TC1 钛合金数据库建立

在 Pamstamp 软件中建立 TC1 钛合金的钣金成形性能数据库, 如图 6 所示, 该整流罩屏零件的仿真材料属性选择 TC1-650-0.0018, 分别表示材料为 TC1 钛合金, 变形温度为 650 °C, 应变速率为 0.0018 s^{-1} 。

1.5 有限元网格划分

基于 Pamstamp 软件自带的网格划分模块, 根据模型的曲面特点, 按大平面网格粗大、过渡曲面网格中等、转接 R 处网格尺寸细小的原则对模型的网格大小进行合理划分。模拟过程中, 划分网格的平均尺寸越小, 精度越高; 划分网格的平均尺寸越大, 模拟时间越长。本文对凸模、凹模和压边圈的最大网格尺寸设置为 8 mm, 最小设置为 1 mm, 要求划分的网格无重叠、漏洞和间隙等缺陷^[11]。

2 拉深工艺模拟及结果分析

初步仿真结果表明, 零件坯料的尺寸和形状对拉深过程中坯料的流动方式有很大影响: 若坯料尺寸过大, 则会导致拉深时的走料困难, 坯料中心过度减薄; 坯料尺寸过小, 则型面起皱严重, 不符合型面质量要求。同时, 在拉深过程中法兰边会存在较大的周向压应力, 而零件在热成形温度作用下的强度变低, 材料流动过程中法兰边会出现起皱情况, 起皱影响材料继续流动, 使得零件壁厚减薄。因此, 本节分别从坯料尺寸和法兰边型面两方面进行优化设计。

2.1 坯料尺寸计算

坯料尺寸计算主要通过下列方法^[12-13]: (1) 采用等体积法计算, 即通过几何尺寸计算零件体积或采用三维模型测量坯料体积, 根据公式 $V = t\pi D^2/4$ 求解坯料的直径 D , 其中, t 为板料厚度, V 为所测量的零件体积, 最终得到零件坯料的外径尺寸为

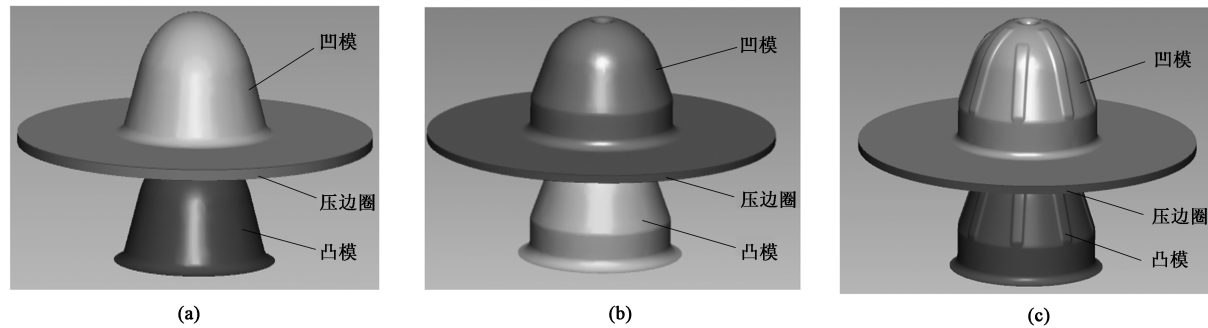


图 5 热拉深有限元模型
(a) 第 1 次拉深 (b) 第 2 次拉深 (c) 第 3 次拉深
Fig. 5 Finite element models of hot drawing
(a) The first drawing (b) The second drawing (c) The third drawing

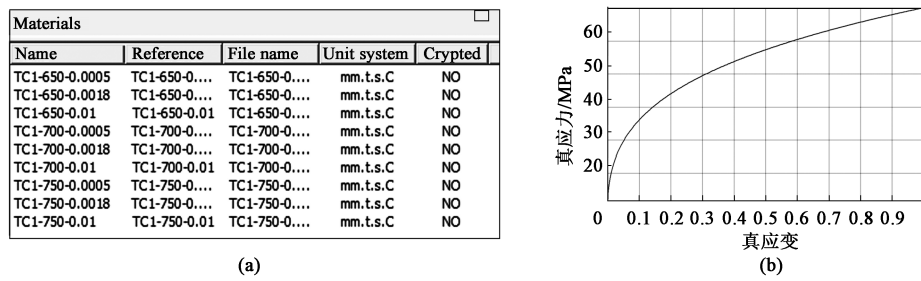


图 6 TC1 钛合金钣金成形性能数据库
(a) 材料属性 (b) 硬化曲线
Fig. 6 Formability database of TC1 titanium alloy sheet
(a) Material properties (b) Hardening curve

$\Phi 322.0$ mm; (2) 基于 PAMSTAMP 的 Inverse 反算模块, 对零件中性层面进行有限元网格划分, 网格尺寸最大为 8 mm、最小为 1 mm, 采用坯料展开模块对零件坯料尺寸进行求解, 最终得坯料内、外直径分别 $\Phi 11.5$ 和 $\Phi 326.4$ mm。零件坯料的展开示意图如图 7 所示。

综上, 考虑到零件最终工艺余量和实际拉深需要, 一般坯料规格单边余量为 20~40 mm, 即直径为 $\Phi 366.4\sim\Phi 406.4$ mm, 本次模拟初步设计拉深坯料外径尺寸为 $\Phi 370$ mm。

2.2 零件法兰边型面优化

零件拉深过程中法兰边存在较大的周向压应力,

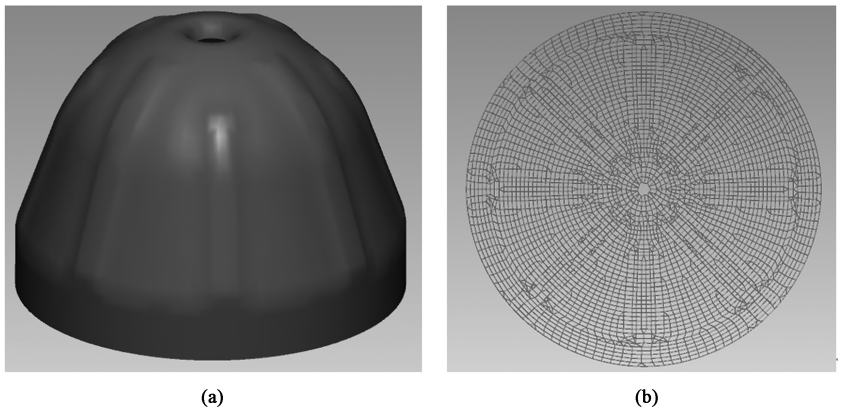


图 7 零件坯料展开示意图
(a) 零件中性层面模型 (b) 展开后的坯料有限元网格模型
Fig. 7 Expanded schematic diagram of part blank
(a) Neutral layer model of part (b) Finite element mesh model of expanded blank

而零件在热成形温度作用下强度变低，材料流动过程中法兰边会出现起皱情况，起皱会影响材料继续流动，使得零件壁厚减薄。因此，在一定的温度和压力条件下，可以调整坯料法兰边形状，以减少零件起皱。考虑在圆形坯料的最外边添加矩形凹窝（即凹窝坯料），以降低起皱程度，优化后的坯料外形和尺寸如图 8 所示，共添加 19 个宽度为 14 mm 的矩形凹窝，沿径向外侧有 38 个半径为 3 mm 的圆角，沿径向内侧有 38 个半径为 2 mm 的圆角。

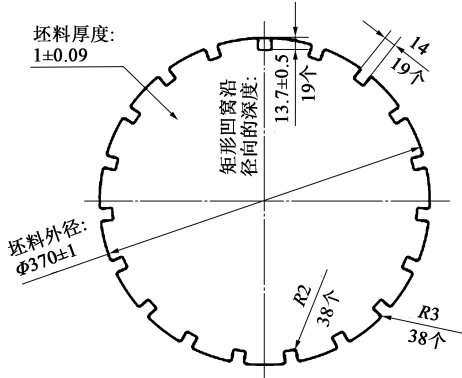


图 8 坯料的外轮廓添加矩形凹窝示意图
Fig. 8 Schematic diagram of adding rectangular dimple on outer contour of blank

2.3 模拟过程及结果分析

工艺路线和坯料外形尺寸对零件拉深成形的走料

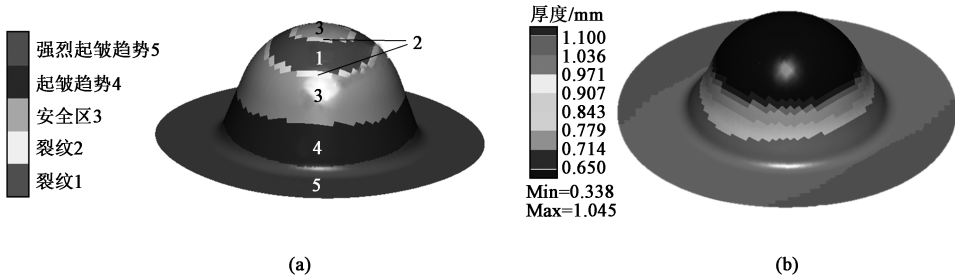


图 9 圆盘坯料的第 1 次拉深模拟结果
(a) 成形极限图 (b) 厚度变化图
Fig. 9 Simulated results of the first drawing for disk blank
(a) FLD (b) Changing diagram of thickness

(2) 采用凹窝坯料进行成形过程模拟，设置坯料尺寸为 $\Phi 370$ mm。当模具闭合后，进行第 1 次拉深的模拟结果如图 10 所示。从图 10 a 中可以看出，零件型面出现了严重的起皱现象，型面质量较差；从图 10b 中可以看出，该区域的坯料最小厚度为 0.503 mm，故该加工方案不建议采用。因此，采用凹窝坯料无法通过模具一次性拉深出零件型面。

方式、拉裂和起皱等成形缺陷有重要影响。研究在一定的拉深工艺参数条件下坯料的外形尺寸和工艺路线对零件拉深质量的影响，拉深仿真模拟的工艺参数为：压边力为 50 kN，拉深速度为 $5000\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.12、模具闭合间隙为 1.1 mm。拉深的具体模拟内容如表 1 所示。

表 1 零件拉深的模拟方案
Table 1 Simulation schemes of part drawing

模拟方案	坯料外形	第 1 次拉深	第 2 次拉深	第 3 次拉深
2 次成形	圆盘坯料	拉深型面	成形凸筋	—
	凹窝坯料	拉深型面	成形凸筋	—
3 次成形	圆盘坯料	预拉深	拉深型面	拉深凸筋
	凹窝坯料	预拉深	拉深型面	拉深凸筋

2.3.1 2 次成形过程模拟

(1) 采用圆盘坯料进行 2 次成形过程模拟，设置坯料尺寸为 $\Phi 370$ mm，当模具闭合距离为 51 mm 时，进行第 1 次拉深的模拟结果如图 9 所示。从图 9a 中可以看出，零件顶部出现拉裂现象，其中两裂纹之间为拉裂区域；从图 9b 中可以看出，该区域的坯料最小厚度为 0.338 mm，故该加工方案不建议采用。因此，采用圆盘坯料无法通过模具一次性拉深出零件型面。

2.3.2 3 次成形过程模拟

(1) 采用圆盘坯料进行 3 次成形过程模拟，模拟结果如图 11 所示，设置坯料尺寸为 $\Phi 370$ mm。从图 11a 中可以看出，零件进行第 2 次拉深后顶部出现拉裂现象；从图 11b 可以看出，零件顶部的有效坯料最小厚度为 0.491 mm，故该加工方案不可行。

(2) 采用凹窝坯料进行 3 次成形过程模拟，模拟结果如图 12 所示，设置坯料尺寸为 $\Phi 370$ mm。

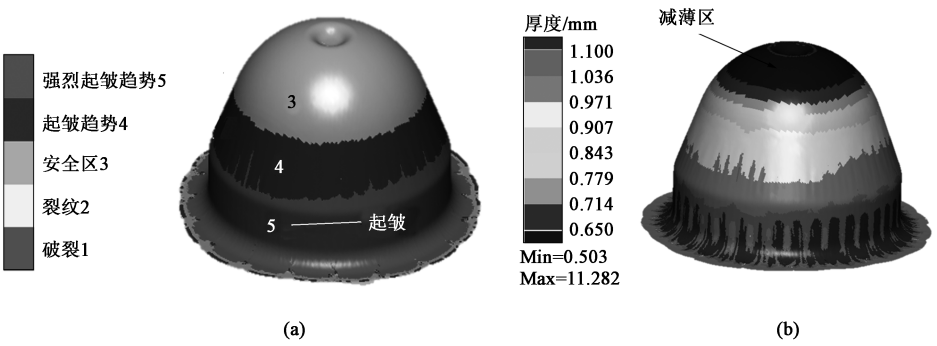


图 10 凹窝坯料第 1 次拉深模拟结果
(a) 成形极限图 (b) 厚度变化图
Fig. 10 Simulated results of the first drawing for dimple blank
(a) FLD (b) Changing diagram of thickness

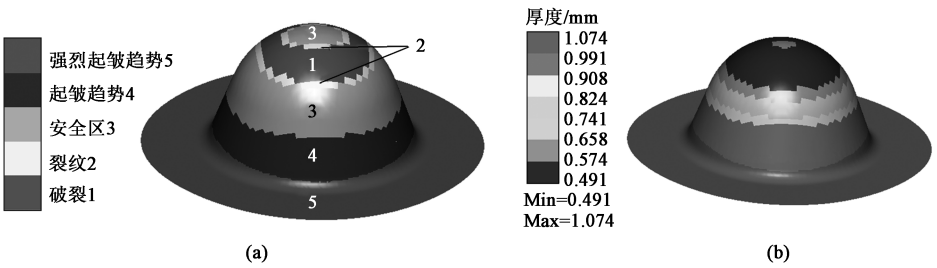


图 11 圆盘坯料第 2 次拉深模拟结果
(a) 成形极限图 (b) 厚度变化图
Fig. 11 Simulated results of the second drawing for disk blank
(a) FLD (b) Changing diagram of thickness

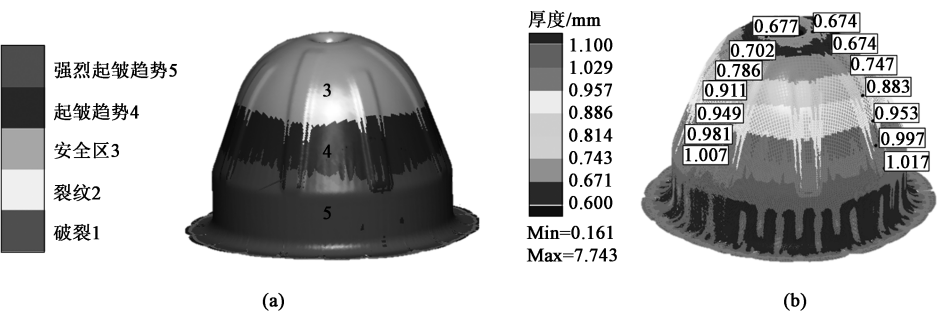


图 12 凹窝坯料第 3 次拉深模拟结果
(a) 成形极限图 (b) 厚度变化图
Fig. 12 Simulated results of the thrid drawing for dimple blank
(a) FLD (b) Changing diagram of thickness

从 12a 中可以看出，零件顶部无拉裂现象，型面无严重的起皱趋势；从图 12b 中可以看出，零件顶部的有效坯料最小厚度为 0.674 mm，大于最小厚度 0.650 mm 的要求，故该加工方案能够改善零件的过度减薄缺陷，具备实施条件。

综上，模拟优化后工艺方案为：下料—第 1 次拉深（预成形）—第 2 次拉深（拉深型面）—钻孔（顶部）—第 3 次拉深（拉深凸筋）—检验。

2.4 实验验证

按照模拟工艺方案使用 3 套热成形模具加工零件，经现场实验验证，热拉深工艺参数为：热成形温度为 680 ℃、压边力为 30 kN、摩擦因数为 0.125、模具闭合间隙为 1.1 mm。使用带凹窝坯料且坯料直径为 $\Phi 370$ mm 时，零件表面无起皱和拉裂缺陷，成形质量较好。对加工的零件采用激光三维扫描检测设备检验壁厚，发现零件的

最小壁厚为 0.69 mm, 满足最小厚度要求。综上, 按优化后的拉深工艺进行实际生产实验, 模拟结果与实际一致, 其中加工出的零件如图 13 所示。

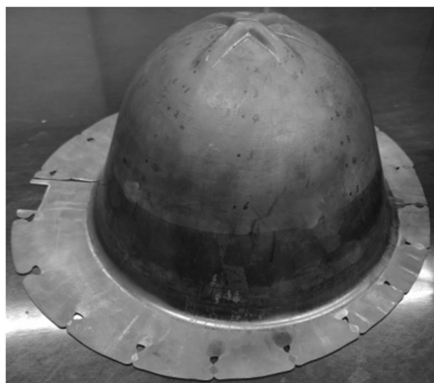


图 13 合格的零件

Fig. 13 Qualified part

3 结论

(1) 钣金仿真模拟软件 PAMSTAMP 能够很好地模拟整流罩屏零件的拉深过程, 拉深成形过程与模拟结果与实际吻合较好。

(2) 坯料尺寸和工艺路线共同影响整流罩屏零件的热拉深成形质量。制定的带窝坯料能够有效降低法兰边起皱, 促进坯料流动, 提高零件加工质量; 同时根据零件结构特点, 增加预拉深工艺能够降低材料减薄率。

(3) 在为压边力为 30 kN、拉深速度为 $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.12 和模具闭合同隙为 1.1 mm 的条件下, 周向均布凹窝、外圆直径为 $\Phi 370 \text{ mm}$ 的坯料可以成形出合格的整流罩屏零件。

参考文献:

- [1] 王金鹏, 党恩, 杨永强, 等. 热拉深工艺在薄壁法兰中的应用 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 45-51.
Wang J P, Dang E, Yang Y Q, et al. Application of hot drawing process in thin-walled flange [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 45-51.
- [2] 简永诚, 肖逸伟, 丁永峰, 等. TC 系列钛合金锻造及组织性能调控工艺研究进展 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 22-33.
Lin Y C, Xiao Y W, Ding Y F, et al. Research progress on forging and control technology of microstructure and performance for TC series titanium alloys [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 22-33.
- [3] 欧阳金栋, 陈明和, 刘慧慧, 等. TC1 钛合金的高温流变行为 [J]. 机械工程材料, 2015, 39 (11): 27-31.

- Ouyang J D, Chen M H, Liu H H, et al. Flow behavior of TC1 titanium alloy at high temperature [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39 (11): 27-31.
- [4] Seo H Y, Jin C K, Kang C G. Effect on blank holding force on blank deformation at direct and indirect hot deep drawings of boron steel sheets [J]. Metals, 2018, 8 (8): 574-585.
- [5] Nawaya T, Hehl A V, Wagner S, et al. Hot deep drawing processing of titanium sheet metal parts for high temperature applications [J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21 (4): 1800544.
- [6] 方秀荣, 王自亮, 杨锦辉, 等. TC4 钛合金锻件疲劳寿命分析及其仿真模型修正 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 1-9.
Fang X R, Wang Z L, Yang J H, et al. Fatigue life analysis and simulation model modification on TC4 titanium alloy forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 1-9.
- [7] 丁月霞, 马燕楠, 郭群, 等. 6061 铝合金超薄壁弯管制造工艺及组织性能研究 [J]. 航空制造技术, 2016, 512 (17): 50-54.
Ding Y X, Ma Y N, Guo Q, et al. Fabrication process and microstructure properties of 6061 aluminum alloy thin wall elbow [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 512 (17): 50-54.
- [8] GB/T 24171.2—2009, 金属材料 薄板和薄带 成形极限曲线的测定 第 2 部分: 实验室成形极限曲线的测定 [S].
GB/T 24171.2—2009, Metallic materials—Sheet and strip—Determinations of forming limit curves—Part 2: Determinations of forming limit curves in laboratory [S].
- [9] 沈小强. 压缩机上外罩制作的工艺实施 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 82-88.
Shen X Q. Implementation on manufacturing process for upper cover of compressor [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 82-88.
- [10] Xie J M, Sun D Y, Xu C Y, et al. The influence of finite element meshing accuracy on a welding machine for Offshore Platform's modal analysis [J]. Polish Maritime Research, 2018, 25 (S3): 147-153.
- [11] 黄珍媛, 谭朋朋, 李超. 薄壁高矩形金属食品罐多道次拉深工艺设计 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 40-45.
Huang Z Y, Tan P P, Li C. Multi-pass drawing process design on thin-walled high rectangle metal food can [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 40-45.
- [12] 罗从伟, 姚向军. 用 DYNIFORM 软件进行毛坯尺寸计算与排样 [J]. 轻工机械, 2007, 88 (4): 58-59.
Luo C W, Yao X J. Calculation and nesting of blank with DYNIFORM [J]. Light Industry Machinery, 2007, 88 (4): 58-59.
- [13] 于传浩, 张毅. 基于 Dynaform 的凸缘圆筒件拉深工艺有限元分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 56-61.
Yu C H, Zhang Y. Finite element analysis on drawing process for cylinder parts with flange based on Dynaform [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 56-61.