

## 喙形 U 状长环唇口多道次复合拉深控形技术

白 颖, 韩艳彬, 刘 波, 鲁 帆, 李世峰, 赵伟民

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

**摘要:** 喙形 U 状长环硬铝唇口结构复杂, 拉深成形困难。借助有限元数值模拟技术开展了喙形 U 状长环唇口两道次复合拉深成形方法研究, 提出一种多道次拉深成形初始工序件的设计方法, 通过展开毛坯逆推法确定了初始工序件的合理成形高度, 分析了首道次充液拉深压边间隙、初始反胀压力和最终液室压力等关键工艺参数对材料厚度变化的影响, 以指导制定首道次拉深试验方案。提出一种变间隙反拉深模具结构设计方法, 通过第 2 道次反拉深成形将零件内外表面进行转换, 均匀材料厚度的变化量。试验结果表明: 充液拉深和反拉深的有效结合可以成形截面为深 U 状的复杂唇口零件, 合理的工艺模型、压边间隙和液室压力加载轨迹可以改善复杂结构拉深成形缺陷, 减小唇口的屈曲变形和回弹。

**关键词:** 充液拉深成形; 反拉深; 反胀压力; 液室压力; 压边间隙

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.014

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 06-0116-10

## Shape control technology of multi-pass composite drawing for beak-shaped and U-shaped long ring lip

Bai Ying, Han Yanbin, Liu Bo, Lu Fan, Li Shifeng, Zhao Weimin

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

**Abstract:** The structure of beak-shaped and U-shaped long ring lip hard aluminum is complicated, and it is difficult to form by drawing. Therefore, based on the finite element numerical simulation technology, the two-pass composite drawing method for the beak-shaped and U-shaped long ring lip was researched, and a design method for the initial process part of multi-pass drawing was put forward. Then, the reasonable forming height of initial process part was determined by the inversion method of unfolding blank, and the influences of key process parameters such as blank holder clearance, initial anti-expansion pressure and final liquid chamber pressure of the first pass hydroforming on the thickness changes of material were analyzed to guide the formulation of the first pass drawing test scheme. Furthermore, a design method of variable clearance anti-drawing die structure was proposed, and through the second pass anti-drawing, the inner and outer surfaces of part were converted, and the change amount of uniform material thickness was obtained. The test results show that the complex lip parts with a deep U-shaped cross section can be formed by the effective combination of hydroforming and anti-drawing. Thus, the reasonable process model, blank holder clearance and liquid chamber pressure loading trajectory can not only improve the drawing defects in complex structures but also reduce the buckling deformation and springback of lips.

**Key words:** hydroforming; anti-drawing; anti-expansion pressure; liquid chamber pressure; blank holder clearance

随着国内外航空制造技术的不断发展, 新型飞机一体化发动机唇口结构由于拥有优异的气动外形和良好的密封环境而被设计推崇。传统发动机唇口多采用 3~4 段的分体结构, 分体式唇口成形后经切边、修配后再铆接对合。由于 U 形敞口分体式唇口成形时内外部应力分布不均匀, 导致成形后贴模度低、外形精度差、回弹大, 在装配过程中对接困难、

装配应力不易消除, 且分体式唇口成形过程中重复工序多、生产效率低、制造成本大、产品耗时长, 越来越不适应新研飞机低成本、高效率的研制需求。航空产品轻量化和精密化的发展趋势向整体唇口结构提出了挑战, 设计理念的革新为飞机整体唇口加工技术开辟了一条勇于探索的新途径。

飞机发动机唇口长期承受超高强度、超高频率的复杂载荷, 其加工精度及性能指标要求较高。新型整体唇口结构预言了飞机性能在强度和气动性上的提升, 它的成功制造将对航空钣金领域整体封闭结构数字化精确成形技术起到引领和推动

**收稿日期:** 2023-11-26; **修订日期:** 2024-03-02

**作者简介:** 白 颖 (1972-), 女, 学士, 研究员级高工

**E-mail:** baiyingsyh@163.com

作用。

受飞机发动机进气道结构的影响, 整体唇口结构近乎圆形或长圆形。相比之下, 长圆形环状唇口的塑性变形更加复杂。充液成形技术<sup>[1-4]</sup>具有成形质量好和成形极限高等优点, 可以成形结构复杂的零件。反拉深<sup>[5-7]</sup>是二次拉深成形的一种有效工艺, 适用于锥形、球形和抛物线形等深腔零件的成形。采用反拉深, 能有效提高板材的拉深比, 降低材料硬化程度, 避免破裂缺陷发生, 减小起皱风险, 提高壁厚的均匀性。

本文针对中部喙状、深U截面、长圆形环状唇口的复杂结构, 以Pam-Stamp 2G有限元分析<sup>[8]</sup>为指导, 充分利用反拉深技术及充液成形技术优势, 探索长宽比例悬殊的深U形窄长环状封闭铝合金唇口成形方法, 实现异形唇口整体成形。

## 1 零件分析

唇口外轮廓呈现为长宽比近乎2:1的长圆形环状封闭结构。唇口截面为深U形, U形深腔高度达137 mm, U形深腔内外壁之间的最大距离不超过60 mm, 内壁两端半圆形转角半径 $R=129$  mm, 内壁包围的狭长空间长宽比例大于2.5, 增大了内部转角材料起皱的风险, 唇口外壁中部有一鸟嘴状凸起, 以便与进气道前罩顶部光滑过渡, 唇口设计结构及其横截面尺寸如图1所示。受飞机轻量化和工作环境需求, 唇口材料为2024固溶态硬铝合金, 厚度 $t=2$  mm。

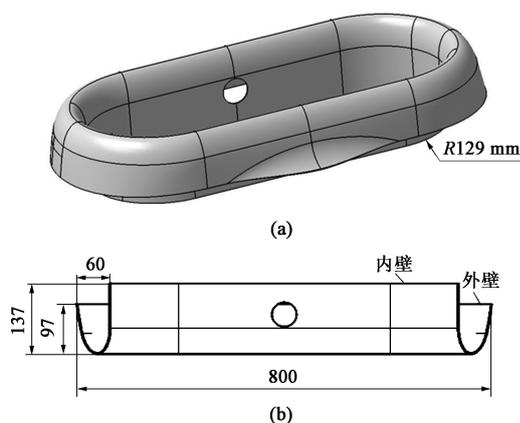


图1 唇口设计结构 (a) 及其截面尺寸 (b)

Fig. 1 Design structure (a) and cross-section sizes (b) of lip

唇口装配关系复杂, 内壁与环状机加对接支架贴合铆接, U形深腔敞口处嵌入30 mm深环状槽型机加搭接框, 唇口外壁2 mm处沿厚度方向与

复材侧壁单体对接, 形成光滑的进气道前罩组件封闭外形。如此严格的装配关系, 要求唇口材料的厚度变化不得超过原材料厚度的20%, 轮廓公差在 $\pm 0.5$  mm范围内, 贴胎精度 $\leq 0.5$  mm。不均匀的外形结构、低延展的材料特性以及大落差的成形深度集合了唇口传统拉深整体性差、壁厚减薄量大、变形一致性差等诸多缺陷, 失稳破裂风险极大, 成形后的贴胎精度和装配精度难以保证。

利用唇口内部转角半径 $R129$  mm、内壁高度137 mm以及外壁高度97 mm, 初略估算唇口的一次拉深系数约为0.301, 小于2道次铝合金极限拉深系数0.35~0.40<sup>[9]</sup>, 传统2道次正拉深无法成形出长宽比例悬殊的深U形环状封闭铝合金唇口。正、反复合拉深的总拉深系数是正拉深系数和反拉深系数的乘积<sup>[10]</sup>, 此数值远小于单次拉深系数, 适用于外形曲率要求严格、成形中容易出现失稳起皱和疲劳开裂的深U形窄长形唇口的高效成形。

均匀唇口渐次成形变形量, 掌握反拉深工艺型面设计、唇口过渡构件复合加载成形工艺及渐次成形准确制坯技术, 是该项攻关的几个关键技术。借助有限元数值模拟分析拉深成形工艺方案设计的合理性, 指导制定最优试验方案, 以解决中间工序毛坯变形的复杂性和不确定性。

## 2 数值模拟

充液成形工艺是一种利用柔性的液体介质替代部分传统刚性模具, 使坯料在高压液体的作用下按照预先设计的轮廓发生塑性变形从而成形出所需零件的先进成形方法。与传统拉深方法相比, 充液拉深方法具有凸模部位的“摩擦保持”效果以及法兰部位的“流体润滑”效果, 可提高成形极限、表面质量和外形精度。

板材充液成形技术主要包括主动式和被动式两种。主动式板材充液成形是通过控制压边力使坯料产生拉-胀成形, 因此, 非常适于形状复杂、深度较小的零件成形, 如异形蒙皮。被动式板材充液成形即充液拉深, 是通过液室压力使坯料紧紧贴在凸模上, 形成“摩擦保持”效果, 可有效缓和凸模圆角处的径向拉应力, 提高传力区承载能力, 更适合成形深腔类零件。基于唇口结构特征, 相比于主动式充液成形, 被动式充液成形该类零件时, 深腔部分相对更不易破裂。

借助 Pam-Stamp 2G 充液成形和拉深成形有限元数值模拟技术开展长环唇口复合成形方法研究。双环状封闭零件的成形方法一般有两种：(1) 正拉深，先拉深内壁，再将法兰经多道次拉深出外壁；(2) 反拉深，先拉深外壁，再多道次反拉深出内壁。由于长环状唇口的内壁长宽比例 (5:2) 大于外壁长宽比例 (2:1)，内壁环形更趋狭长，相比之下反拉深的工艺性更好。

按以往经验，独立的反拉深成形过程中材料减薄量不大，为此，唇口成形方案初定为：首道次充液拉深外壁，减小大法兰深腔过渡件的材料减薄量；第 2 道次反拉深内壁，在传统拉深过程中零件的内、外表面相互转换，加大材料的变形程度，抵消零件内部滞留的残余应力，提高零件成形的工艺性。

### 2.1 材料参数

本文研究材料是厚度为 2 mm 的固溶态 2024 铝合金，对 2024-O (包铝) 进行物性测试，试验中板材的真实应力-真应变数据采用双 Voce 公式按最小二乘法进行拟合，拟合数据取自屈服点至抗拉极限之间，拟合结果如图 2 所示。2024-O (包铝) 材料的物性参数如表 1 所示，其中 2024-O-2.0-0 表示厚度为 2.0 mm 的固溶态 2024 铝合金试件的拉伸方向与材料纤维方向平行，2024-O-2.0-90 表示试件拉伸方向与材料纤维方向垂直。表 1 中数据显示，固溶态 2024 铝合金材料的伸长率为 16%。

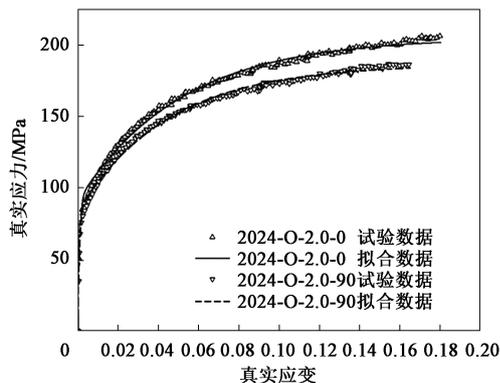


图 2 2024-O 铝合金板材真实应力、真实应变的试验值和拟合值比较

Fig. 2 Comparison of true stress and true strain between test and fitted values for 2024-O aluminum alloy sheet metal

表 1 2024-O (包铝) 的材料参数

Table 1 Material parameters of 2024-O (Alclad)

参数	杨氏模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\gamma$	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	伸长率 $A/\%$	硬化指数 $n$
数值	72	0.33	80	155	16	0.32

### 2.2 工艺型面设计

型面设计作为冲压工艺设计中最为关键的部分，主要包括压料面设计、工艺补充面设计等，型面设计的质量决定着零件的成形质量和成形精度。唇口的工艺型面按照成形次序分为初始过渡工艺面和最终成形工艺面，首道次充液拉深成形初始工序件，第 2 道次反拉深成形最终成形工序件。

采用逆推法，对长环形唇口内壁底部进行封闭，并对外壁进行工艺余量补偿，首先构造最终外翻边的盆状成形工序件，如图 3 所示。进行工艺余量补偿的原则为：过渡直线段尽量小，以降低零件成形高度；过渡圆角尽量大，保证型面光滑圆顺，过渡圆角半径  $R_0 = (8 \sim 12)t$ ；不加大拉深难度；唇口缘状凸起部位过渡圆角半径取值可以更大些。

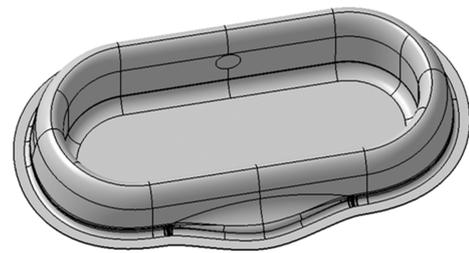


图 3 唇口最终成形工序件设计结构

Fig. 3 Design structure of final forming process part for lip

依据最终成形工序件设计初始工序件，以最终成形工序件的外侧型面作为初始工序件的外侧型面，利用有限元分析软件展开模块功能，计算出最终成形工序件的展开毛坯尺寸 (长度为 1070 mm、宽度为 900 mm)。图 4 为最终成形工序件及其展开毛坯结构示意图。

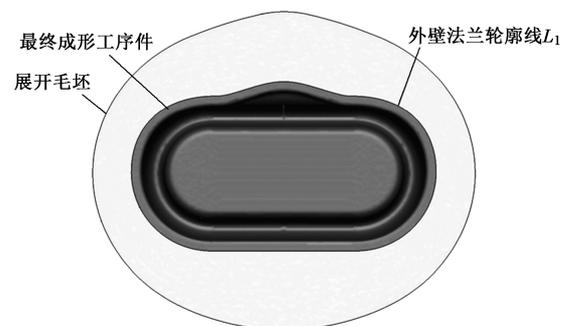


图 4 最终成形工序件及其展开毛坯结构

Fig. 4 Structures of final forming process part and its unfolded blank

鉴于最终成形工序件为对称结构，如图 5 所示<sup>[11]</sup>，利用最终成形工序件的外壁法兰轮廓线  $L_1$ 、外壁投影线  $L_2$ 、纵横向对称线的交点  $O_1$  和  $O_2$ 、以及长轴对称线与展开毛坯轮廓线交点  $M_1$  和  $M_2$ ，

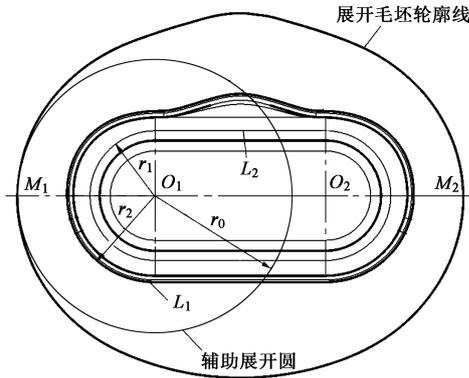


图5 辅助展开圆计算方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of calculation method for auxiliary unfolding circle

沿长轴对称线选择最终成形工序件任一侧进行分析。点  $O_1$  为最终成形工序件一侧半圆形端部的圆心点，过点  $O_1$  以线段  $O_1M_1$  的距离为半径做圆，得到辅助展开圆，即最终成形工序件半圆形端部展开毛坯形状，分别测量外壁投影线  $L_2$ 、半圆形端部半径  $r_1$ 、外壁法兰轮廓线  $L_1$ 、半圆形端部半径  $r_2$ ，以及辅助展开圆半径  $r_0$ 。利用简单旋转体拉深件毛坯直径  $D_0$  计算公式（式（1））<sup>[9]</sup>，反推初始工序件的成形高度  $h$ （式（2））。

$$D_0 = \sqrt{d_2^2 + 4d_1h} \quad (1)$$

$$h = \frac{D_0^2 - d_2^2}{4d_1} \quad (2)$$

式中： $D_0 = 2r_0$ ； $d_1$  为外壁投影线  $L_2$  端部的圆形直径， $d_1 = 2r_1$ ； $d_2$  为外壁法兰轮廓线  $L_1$  端部的圆形直径， $d_2 = 2r_2$ 。

经计算得到初始工序件的成形高度  $h = 216 \text{ mm}$ 。

由最终成形工序件外侧型面和内外壁分界线  $L_0$ 、最终成形工序件的外壁法兰轮廓线  $L_1$ 、外壁投影线  $L_2$ ，以及经计算得到的初始工序件的成形高度  $h$ ，通过作图得到初始工序件，如图6所示。

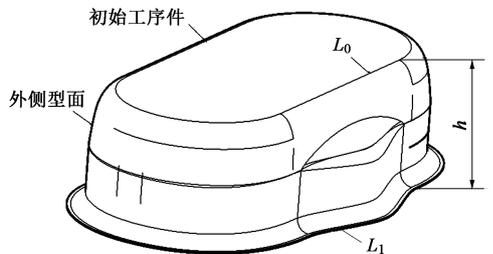


图6 初始工序件设计结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of design structure for initial process part

## 2.3 首道次充液拉深模拟

### 2.3.1 首道次充液拉深模型建立

开展首道次充液拉深有限元模拟分析。首道次充液拉深仿真模型由凸模、凹模、压边圈以及毛坯组成。凸、凹模及压边圈视为刚性体。模型中，毛坯为成形过程中唯一受力变形的部件，为此在划分网格时相对密集一些，设置网格大小为  $4 \text{ mm}$ ，得到  $52693$  个四边形单元和  $892$  个三角形单元。在实际生产中，模具与零件之间的摩擦因数对材料的流动影响显著。利用充液成形优势优化模拟接触条件，将凹模与毛坯之间的摩擦因数设定为  $0.05$ ，以降低零件成形过程中的减薄量，凸模与毛坯之间的摩擦因数同传统拉深工艺保持一致，设为  $0.12$ ，压边圈与毛坯之间的摩擦因数设为  $0.10$ ，建立的仿真模型如图7所示。模拟采用双动成形方法，液体作为传力介质，且默认液室压力均匀作用在板料下表面。凸模、压边圈在进行模拟时的下行速度设置为  $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

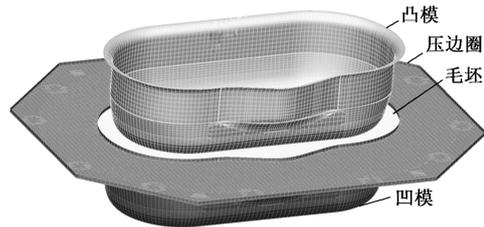


图7 首道次充液拉深仿真模型

Fig. 7 Simulation model of hydroforming in the first pass

### 2.3.2 关键工艺参数的影响分析

初始反胀压力、最终液室压力及压边间隙是影响薄板充液拉深质量的重要工艺参数<sup>[12]</sup>，也是唇口充液拉深质量的重要可控手段。

首道次充液拉深采用定压边间隙，压边间隙即为凹模与压边圈之间的间隙，合理的压边间隙不仅可以为板材成形提供有益摩擦，同时在法兰处由于压边间隙的存在，凹模型腔内的液体会流经凹模上表面，在板材进料的过程中起到润滑作用，减小摩擦力引起的能量消耗现象以及减小径向拉应力，从而改善板材的成形性能，提高壁厚均匀性<sup>[13]</sup>。将压边间隙在  $1.95 \sim 2.40 \text{ mm}$  范围内设置为不同的数值，即从完全压死、无间隙压边到压边间隙逐渐增大来分析压边间隙对板料起皱及减薄情况的影响。

在充液拉深成形初期，凸模在冲压方向上距离板料有一个高度值，液室内通入一定的初始液室压力（初始反胀压力）使得板料向上胀高，即初始反

胀高度<sup>[14]</sup>。合理的反胀压力可以实现储料和有效润滑、减少凹模圆角处的拉应力。而在接下来的充液拉深过程中,液体压力又起到“摩擦保持”与“软拉延”的效果,可改善成形过程中的应力、应变的分布,促进板料贴模,并可有效抑制板料悬空区域起皱及圆角处破裂。调整液室压力对成形质量起到决定性作用。通过设置合适的初始反胀压力和最终液室压力,可以控制毛坯的进料速度,均衡材料变形。

### 2.3.3 首道次充液拉深模拟分析

综上所述,设计了7组不同压边间隙和5条不同液室压力的加载轨迹,通过正交得到多组首道次充液拉深成形方案并进行仿真模拟,研究不同压边间隙、初始反胀压力和最终液室压力对初始工序件变形的影响规律。图8为不同初始反胀压力下的液室压力加载路径,表2为多组首道次充液拉深成形方案模拟结果。

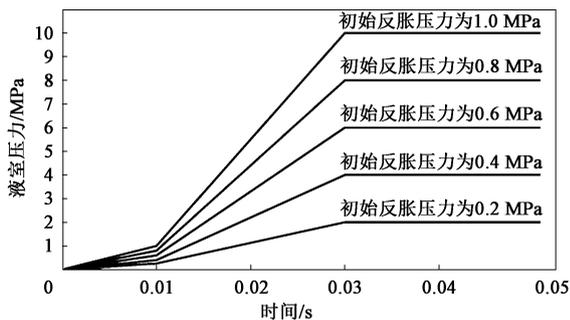


图8 不同初始反胀压力下的液室压力加载路径

Fig. 8 Loading routes of liquid chamber pressure under different initial anti-expansion pressures

分析表2中多组方案的首道次充液拉深成形模拟结果,压边间隙过盈(压边间隙 $b=1.95$  mm)不可行,零件拉深至160 mm时完全断裂。当压边间隙与材料厚度相等时( $b=2.00$  mm),零件整体处于减薄趋势,拉深结束,零件断裂。当压边间隙分别为2.10、2.15、2.20、2.25和2.30 mm时,随着压边间隙的增大,零件的减薄情况得到控制,当压边间隙 $b=2.20$  mm时,材料的减薄控制相对均匀,其中方案22,即初始反胀压力为0.4 MPa、最终液室压力为4 MPa时,初始工序件的材料厚度减薄控制效果最佳。当压边间隙 $b=2.25$  mm时,材料最大减薄率进一步减小,但材料最大增厚率也明显增大,法兰起皱趋势明显。当压边间隙 $b=2.30$  mm时,材料最大减薄率不再减小,但最大增厚率均处于超差范围,由于压边间隙过大,造成零件周围的法兰区域出现不同程度的起皱。

表2 关键工艺参数对首道次充液拉深成形质量的影响  
Table 2 Influence of key process parameters on forming quality of hydroforming in the first pass

模拟方案	压边间隙/mm	初始反胀压力/MPa	最终液室压力/MPa	材料最大减薄率/%	材料最大增厚率/%
1		0.2	2	—	—
2		0.4	4	—	—
3	1.95	0.6	6	—	—
4		0.8	8	—	—
5		1.0	10	—	—
6		0.2	2	91.5	21.3
7		0.4	4	93.7	17.6
8	2.00	0.6	6	99.2	7.48
9		0.8	8	—	—
10		1.0	10	—	—
11		0.2	2	66.8	26.3
12		0.4	4	51.7	21.4
13	2.10	0.6	6	42.3	19.6
14		0.8	8	—	—
15		1.0	10	—	—
16		0.2	2	23.4	24.6
17		0.4	4	27.8	22.5
18	2.15	0.6	6	33.6	22.1
19		0.8	8	75.9	21.8
20		1.0	10	—	—
21		0.2	2	8.29	32.5
22		0.4	4	9.05	27.1
23	2.20	0.6	6	11.9	26.8
24		0.8	8	24.5	26.1
25		1.0	10	91.3	21.6
26		0.2	2	6.15	32.8
27		0.4	4	8.92	29.4
28	2.25	0.6	6	9.64	28.3
29		0.8	8	22.7	35.6
30		1.0	10	52.8	22.9
31		0.2	2	5.55	42.6
32		0.4	4	5.95	36.2
33	2.30	0.6	6	6.99	32.8
34		0.8	8	17.8	29.6
35		1.0	10	26.6	27.2

图9对比了传统拉深和充液拉深的毛坯初始状态和最终模拟效果,其中 $F$ 为初始反胀压力。传统拉深悬空区的材料受凹模圆角作用,径向拉应力增大,零件深度越大,材料减薄越严重。结合图9a经计算可得,传统拉深零件的最大减薄率为23.7%,盆底危险断裂处发生破裂,法兰最大增厚量达到了0.74 mm,明显有起皱趋势。图9b和图9c分别为带有反胀阶段的方案22和方案24的充液拉深模拟效

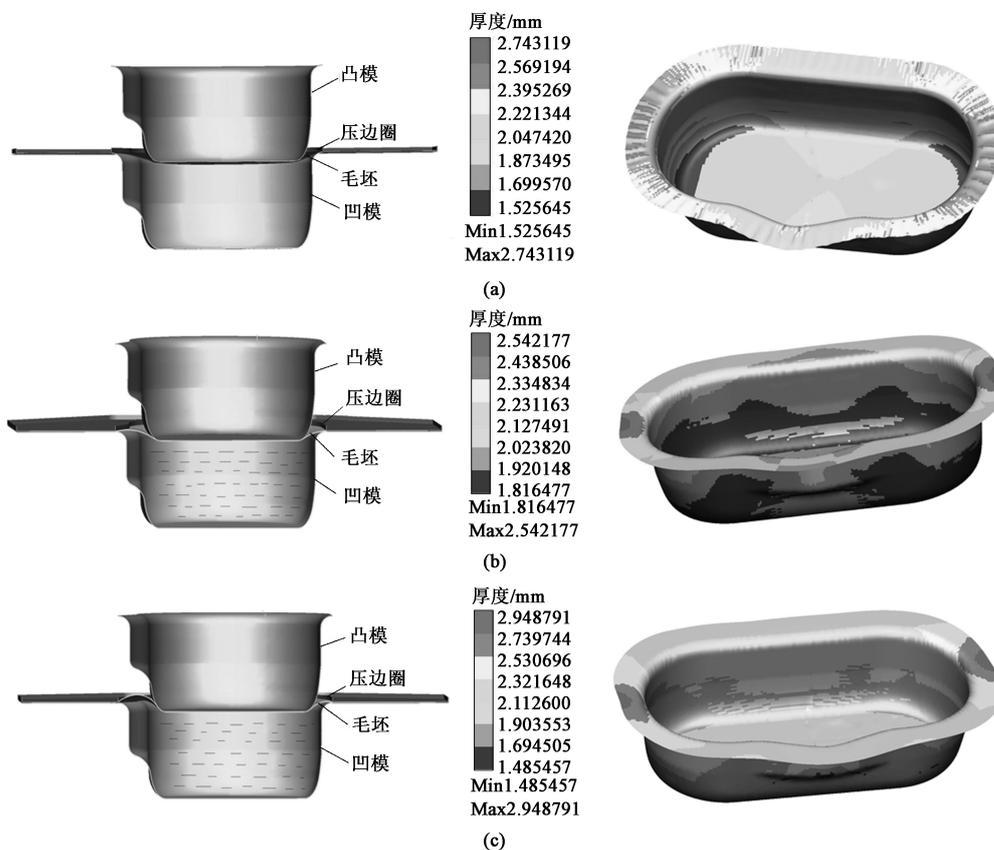


图 9 传统拉深和充液拉深的毛坯状态和模拟效果

(a) 传统拉深 (b) 充液拉深预胀 ( $F=0.4$  MPa) (c) 充液拉深预胀 ( $F=0.8$  MPa)

Fig. 9 Blank states and simulation effects for traditional drawing and hydroforming

(a) Traditional drawing (b) Pre-expansion of hydroforming ( $F=0.4$  MPa) (c) Pre-expansion of hydroforming ( $F=0.8$  MPa)

果。首道次充液拉深模拟结果显示，零件的初始反胀高度随着初始反胀压力的增大而增大。当初始反胀高度为 3.32 mm 时，即方案 22 (图 9b)，初始反胀压力

加速了材料的变薄趋势；当初始反胀高度达到 13 mm 时，即方案 24 (图 9c)，喙部区域材料减薄了 0.49 mm，其对应的成形极限图 (图 10) 显示零件破裂。

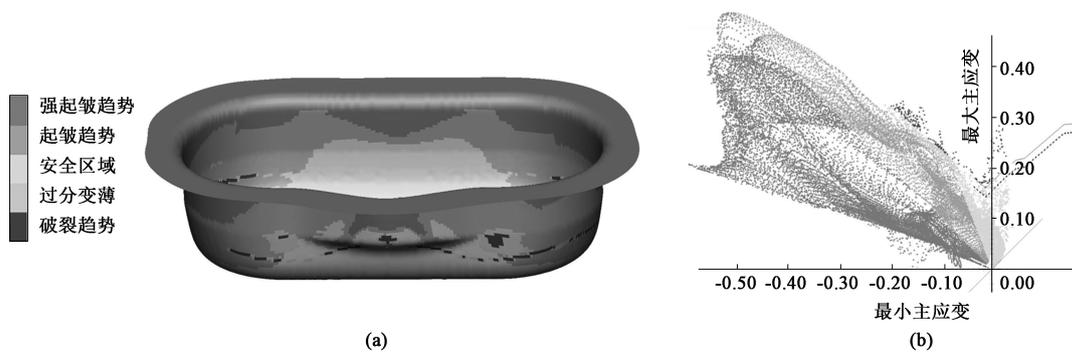


图 10 方案 24 充液拉深成形极限图

(a) 成形安全阀度云图 (b) 成形极限图

Fig. 10 Forming limit diagrams of hydroforming in scheme NO. 24

(a) Nephogram of forming safety valve degree (b) Forming limit diagram

比较表 2 中各项模拟数据，选取压边间隙为 2.20 mm (1.1 倍板材厚度) 的方案 22 为首道次充液拉深最佳成形方案，初始反胀高度为 3.32 mm，为后续

唇口喙状部位拉深储备了材料，有效控制了该处减薄。

### 2.4 第 2 道次反拉深成形模拟

采用首道次充液拉深成形最佳方案 22，材料厚

度最大减薄不超过料厚的 10%，而第 2 道次反拉深成形不会加大材料减薄。从制造成本上考虑，第 2 道次反拉深成形无需采用充液成形，传统拉深即可保证唇口的成形质量。

#### 2.4.1 第 2 道次反拉深模具结构设计

第 2 道次反拉深模具包括成形凸模、凹模和曲面压边圈。按照唇口初始工序件和最终成形工序件结构，设计第 2 道次反拉深模具结构。在第 2 道次拉深成形过程中，转角部位的金属变形量大于直边部位。为了避免直边部位与转角部位金属流动的速度差而引起的剪切应力和变形，合理分配模具各部件间的间隙，以便均衡初始工序件的直边与转角处的流料速度<sup>[15]</sup>。

第 2 道次凹模外工作型面即初始工序件内侧型面，第 2 道次凹模内工作型面即最终成形工序件制模面，最终成形工序件制模面是由最终成形工序件内侧型面向外偏移一个材料厚度 ( $t=2.0\text{ mm}$ ) 得到的。以第 2 道次凹模内工作型面为基准设计第 2 道次凸模，第 2 道次凸模外工作型面和第 2 道次凹模内工作型面之间的模具间隙是一个变量，最终成形工序件两半圆形端部容易起皱，故两半圆形端部对应的模具间隙  $g_1=(1.20\sim 1.25)t$ ，最终成形工序件沿长度方向两侧面较平直，故两侧平面对应的模具间隙  $g_2=(1.10\sim 1.15)t$ ，按照  $g_1$  和  $g_2$  设计第 2 道次凸模，在模具间隙  $g_1$  和  $g_2$  阶差处进行光滑过渡，如此得到第 2 道次凸模外工作型面。第 2 道次凹模通过多个侧向楔型块与凹模模座连接，凸模模座带动第 2 道次凸模做上下运动，压边圈模座带动曲面压边圈进行上下进给，凹模模座 4 个角部设有 4 个压边限位块，用来控制曲面压边圈的下移位置，当压边圈模座下底面与压边限位块上表面贴实时，说明曲面压边圈位置已经调整到位，可以开始曲面压边拉深成形<sup>[11]</sup>。图 11 为反拉深模具关键部件装配关系图。

#### 2.4.2 第 2 道次反拉深模拟模型建立

以初始工序件首道次正拉深模拟结果作为第 2 道次反拉深模拟计算的输入毛坯，它包含了材料首道次变形的厚度、应力分布及应变分布等详细信息，使模拟结果更具指导意义。

压边力是反拉深成形中一个非常重要的工艺参数。若设置的压边力过小，曲面压边圈与第 2 道次凹模的间隙相对又较大，则初始工序件流经凹模内圆角处所受约束较小，径向拉应力大于周向压应力，所成形的零件 U 形转角处将会出现连续褶皱；而压边力过

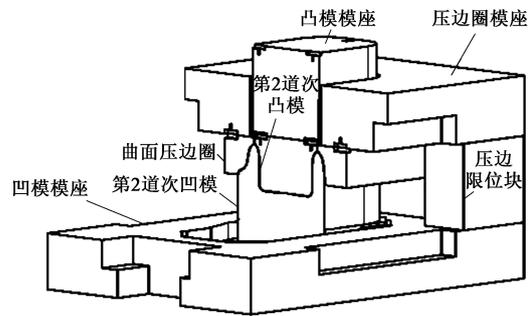


图 11 反拉深模具关键部件装配关系图

Fig. 11 Assembly relationship diagram of key parts for anti-drawing die

大时，虽然可以较好地抑制流经凹模圆角处的材料起皱，但该处板料所受的有害摩擦相应加大，板材流动困难，变形过分集中在凹模内圆角对应的悬空毛坯部位，使材料产生破裂失效。参考双动机床拉深时单位压边力  $q$  的数值表<sup>[9]</sup>，以  $q=3.0\text{ MPa}$  开展第 2 道次反拉深模拟。成形前，将初始工序件底部向上倒放至第 2 道次凹模外工作型面之上，如图 12 所示。

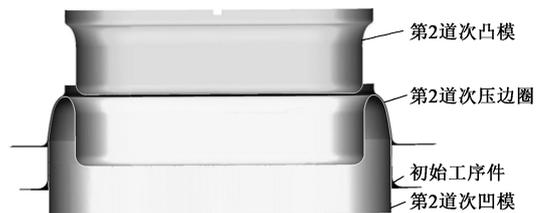


图 12 第 2 道次反拉深模拟模型

Fig. 12 Simulation model of anti-drawing in the second pass

第 2 道次反拉深模拟包含压边和拉深两个阶段。首先，曲面压边圈沿拉深方向向下运行，当触及初始工序件时，曲面压边圈停止运动，压边过程结束；第 2 道次凸模向下运动，初始工序件底部受到向下的拉深力发生变形并带动初始工序件的外侧材料向内流入，曲面压边圈限制了初始工序件外部材料在厚度方向的自由起伏，使其均匀地流入成形凹模内部，随同第 2 道次凸模逐渐形成最终成形工序件内侧型面，而初始工序件外侧型面在适合压边力及合理压边间隙的控制下，形成了光滑的最终成形工序件外侧型面，最终贴敷第 2 道次凹模内型面，形成最终成形工序件。裸露在压边圈外部的材料流动自由，出现了裙摆式褶皱。图 13 为最终成形工序件反拉深材料厚度变化云图，图 13 中的材料厚度数值说明，反拉深未改变首道次成形材料厚度变化极限，仅使材料厚度变化更加均匀。

通过切边模拟，将最终成形工序件工艺余量去除，唇口材料的厚度变化范围在  $1.81\sim 2.39\text{ mm}$  之



图 13 第 2 道次反拉深材料厚度变化云图

Fig. 13 Thickness change nephogram of anti-drawing material in the second pass

间，如图 14 所示，完全符合工程手册<sup>[9]</sup>中对拉深件材料厚度变化的要求。



图 14 唇口零件材料厚度变化云图

Fig. 14 Thickness change nephogram of material for lip part

### 3 验证

按照模拟方案 22 开展唇口多道次拉深成形工艺试验。

#### 3.1 拉深前工作准备

按照展开毛坯尺寸完成激光下料，安装首道次

充液拉深模，如图 15 所示。为了减小材料流动阻力，将展开毛坯与初始凹模接触面一侧贴敷塑料薄膜，并对接触区域涂抹石墨粉和蓖麻油的混合物以充足润滑，依据初始凹模的展开毛坯外形线放置展开毛坯。安装柱状垫块，调整初始压边圈与初始凹模之间的压边间隙，压边间隙最大处分布在初始工序件两半圆形端部区域，其次为喙状凸起相应区域，剩余部位按等料厚进行设置。



图 15 首道次充液拉深模具和毛坯

Fig. 15 Hydroforming die and blank in the first pass

#### 3.2 拉深试验

##### 3.2.1 首道次充液拉深试验

在调整液室压力过程中验证了模拟分析的准确性。当压边间隙为 2.0 mm、初始反胀压力为 0.8 MPa 时（模拟方案 9），悬空区材料的整体减薄量大，零件中部喙形部位出现破裂；减小初始反胀压力、增大压边间隙，法兰周围出现密集、匀称的皱纹，与模拟方案 32 的压边间隙效果十分相近，如图 16 所示。

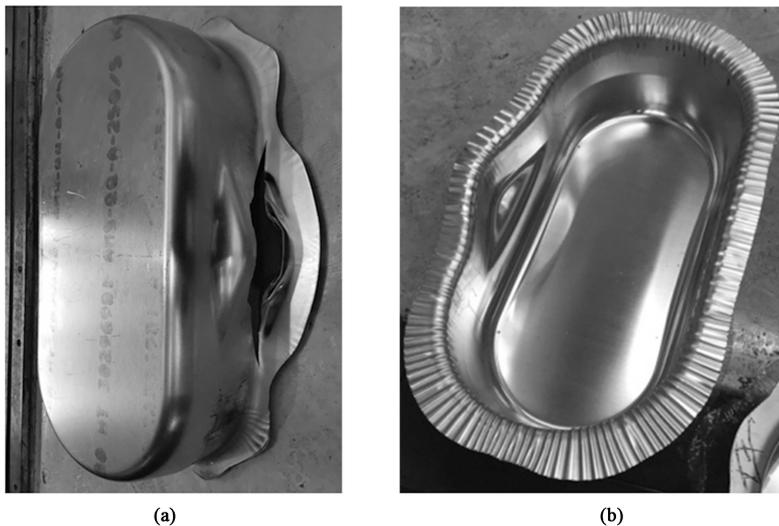


图 16 首道次充液拉深试验中零件喙形部位发生破裂 (a) 及法兰起皱 (b)

Fig. 16 Rupture at beak-shaped part (a) and flange wrinkle (b) in hydroforming test of the first pass

按照最佳模拟方案 22 开展首道次充液拉深试验，在压边力和液室压力的综合作用下展开毛坯逐

渐包裹凸模并贴敷于凸模，得到的初始工序件表面光滑，如图 17 所示。



图 17 合格的初始工序件

Fig. 17 Qualified initial process part

### 3.2.2 第 2 道次反拉深成形试验

安装调试第 2 道次反拉深模。第 2 道次反拉深模增大了转角处的凸、凹模间隙，以均衡板料直边处与转角处的流料量。将初始工序件倒放置于第 2 道次凹模之上，单位压边力设置为  $q = 3.0 \text{ MPa}$ ，进行反拉深试验，零件从内、外型面交界处发生断裂。原材料厚度偏差以及初始工序件法兰区域的增厚是造成破裂的主要原因，对凹模整体去除  $0.2 \text{ mm}$ ，同时将单位压边力调至  $q = 2.9 \text{ MPa}$ ，再次试验。

首先，压边圈模座带动曲面压边圈一起向下运行；当压边圈模座下底面触及压边限位块上表面

时，凸模模座带动第 2 道次凸模向下运动，在第 2 道次凸模和曲面压边圈的共同作用下，初始工序件侧壁逐渐包裹凹模内壁，与凹模间形成  $180^\circ$  包角；由于材料沿凹模流动的摩擦阻力和弯曲抗力较大，消除了首道次充液拉深成形的残余应力，形成唇口光滑的内外侧型面，得到最终成形工序件，如图 18 所示。



图 18 合格的最终成形工序件

Fig. 18 Qualified final forming process part

将最终成形工序件部分余量去除后，按照型胎进行橡皮囊校形，主要是消除侧壁回弹，再经余量切割及修整后，得到了表面质量良好的合格零件，如图 19 所示。经现场装配验证后，满足设计功能要求。



(a)



(b)

图 19 唇口修形工序件 (a) 及合格产品 (b)

Fig. 19 Modification process part of lip (a) and qualified product (b)

## 4 结论

(1) 提出了一种先外后内、两道次拉深成形复

杂双环状唇口的加工方法。充分发挥了充液成形及反拉深成形的优势，在拉深过程中零件内、外表面相互转换，加大了材料的变形程度，抵消了零件内

部滞留的残余应力, 提高了封闭型长环状深腔结构的成形工艺性。

(2) 提出了一种2道次拉深成形最终工序件及初始工序件的设计方法。利用拉深件毛坯直径反推初始工序件的成形高度, 工艺补充型面设计以不加大大拉深难度、过渡圆角半径  $R_0 = (8 \sim 12)t$  为原则, 有效地控制了每道次零件的变形程度。

(3) 通过数值模拟进行了首道次充液拉深成形液室压力加载轨迹优化。在初始反胀压力为 0.4 MPa、反胀高度为 3.32 mm、最终液室压力达到 4 MPa 的条件下, 初始工序件的成形效果最佳, 材料最大减薄率由传统拉深的 23.7% 降至 9.05%, 材料减薄量明显得到改善, 并在后续第 2 道次反拉深成形中, 材料的厚度变化得到进一步优化。

#### 参考文献:

- [1] 邱超斌, 郭庆磊, 郎利辉, 等. 铝合金船形深腔薄壁构件充液成形变形规律研究 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (1): 133-138.
- Qiu C B, Guo Q L, Lang L H, et al. Deformation regularity of aluminum alloy boat shaped deep-cavity and thin-walled part in hydroforming [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (1): 133-138.
- [2] 王亚清, 郭鹏宇, 张帅. 航空发动机环形零件充液拉深成形工艺研究 [J]. 锻造与冲压, 2022, (14): 16, 18-20.
- Wang Y Q, Guo P Y, Zhang S, et al. Research on hydrodynamic deep drawing process of ring-type parts of aero-engine [J]. Forging & Metalforming, 2022, (14): 16, 18-20.
- [3] 徐永超, 韩思雨, 刘胜京. 液室压力加载路径对 5A06 铝合金锥形件充液拉深成形的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 38-43.
- Xu Y C, Han S Y, Liu S J. Influence of cavity pressure loading path on hydroforming for 5A06 aluminum alloy conical cups [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 38-43.
- [4] 周永新, 冯苏乐, 杨学勤, 等. 大径厚比薄壁变曲率构件充液拉深成形技术 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 126-133.
- Zhou Y X, Feng S L, Yang X Q, et al. Hydro-drawing technology for thin-walled variable curvature part with large diameter to thickness ratio [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (4): 126-133.
- [5] 唐季平, 胡传鹏, 魏李, 等. 双筒形皮带轮多道次拉深成形工艺 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (2): 99-102.
- Tang J P, Hu C P, Wei L, et al. Multi-step deep drawing process of double barrel pulley [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10 (2): 99-102.
- [6] 张志超, 徐永超, 苑世剑, 等. 5A06 铝合金中厚板反拉深变形成行为 [J]. 材料工程, 2017, 45 (9): 101-107.
- Zhang Z C, Xu Y C, Yuan S J, et al. Deformation behavior of reverse deep drawing of 5A06 aluminum alloy plate [J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45 (9): 101-107.
- [7] Zhang Z C, Xu Y C, Yuan S J, et al. Reverse deep drawability of 5A06 aluminum alloy plate at elevated temperatures [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26 (6): 1538-1545.
- [8] 李涛泉, 王书恒, 徐岩. 金属板料成形——有限元模拟基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- Li L G, Wang S H, Xu Y. Finite Element Simulation Base of Sheet Metal Forming [M]. Beijing: Beihang University Press, 2008.
- [9] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册·飞机钣金工艺 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- Editorial Committee of Aeronautical Manufacturing Technology Manual. Aeronautical Manufacturing Technology Manual: Sheet Metal Forming [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992.
- [10] 中国锻压协会. 航空航天钣金冲压件制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- Confederation of Chinese Metalforming Industry. Manufacturing Technologies for Aerospace and Aviation Metal Stamping Parts [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [11] 白颖, 鲁帆, 师鹏, 等. 一种深 U 截面中部喙状长环形唇口的两道次拉深成形方法 [P]. 中国: CN202111098742.9, 2023-08-04.
- Bai Y, Lu F, Shi P, et al. Two-pass deep drawing forming method for long annular lip with deep-shaped section and beak-shaped middle [P]. China: CN202111098742.9, 2023-08-04.
- [12] 张小勇, 程鹏志, 王耀, 等. 三维异形截面管件充液成形工艺及优化分析 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (3): 125-130.
- Zhang X Y, Cheng P Z, Wang Y, et al. Hydroforming process and optimization analysis of three dimensional special section tube [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (3): 125-130.
- [13] 洪熠豪, 莫炳俊, 吴菲, 等. 薄壁水槽充液拉深变形规律研究 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (2): 199-208.
- Hong Y H, Mo B J, Wu F, et al. Deformation regularity of sink shaped thin-walled part in hydroforming [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15 (2): 199-208.
- [14] 曾一畔, 董锦亮, 宋炳毅, 等. 飞机复杂曲面蒙皮零件充液拉深技术研究 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (3): 59-65.
- Zeng Y P, Dong J L, Song B Y, et al. Hydrodynamic deep drawing for complex curved skin part of aircraft [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11 (3): 59-65.
- [15] 翟平, 林兆荣. 飞机钣金成形原理与工艺 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2014.
- Zhai P, Lin Z R. Stamping Process & Die Design [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2014.