

## 铝合金橡皮囊拉伸胀形成形分析

宋冠华<sup>1</sup>, 王 辉<sup>1</sup>, 王 瑞<sup>2</sup>, 米齐昊<sup>1</sup>, 王 菲<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 海宁红狮宝盛科技有限公司, 浙江 嘉兴 314400)

**摘要:** 基于橡皮囊工艺对铝合金板料进行拉伸胀形成形, 设计了正交实验, 并将有限元仿真模拟与实验验证相结合, 探究成形压力、板料厚度和压边长度这 3 个因素对板料最大减薄率、底面贴模面积和屈曲变形的影响。结果表明: 成形压力增加, 底面贴模面积和最大减薄率的增幅减小; 板料厚度增加, 底面贴模面积的减幅增大, 最大减薄率的减幅较为均匀; 压边长度为 60 mm 时, 底面贴模面积达到最小, 最大减薄率达到最大。各因素对底面贴模面积的影响从大到小依次为: 成形压力、板料厚度、压边长度, 对最大减薄率则为: 成形压力、压边长度、板料厚度。屈曲变形是成形件内部平衡残余应力的过程, 较大的成形压力和压边长度对其有抑制效果。

**关键词:** 橡皮囊; 铝合金; 胀形; 成形缺陷; 屈曲变形

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.013

**中图分类号:** TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 05-0104-09

### Analysis on stretching and bulging forming of aluminum alloy rubber bladder

Song Guanhua<sup>1</sup>, Wang Hui<sup>1</sup>, Wang Rui<sup>2</sup>, Mi Qihao<sup>1</sup>, Wang Fei<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Haining Red Lion Baosheng Technology Co., Ltd., Jiaxing 314400, China)

**Abstract:** Based on the rubber bladder process, the tensile and bulging forming of aluminum alloy plates was investigated, and an orthogonal experiment was designed. Then, the finite element simulation was combined with the experimental verification to explore the influences of three factors, namely, forming pressure, sheet thickness and blank holder length on the maximum thinning rate, the area of bottom surface in contact with the die and the buckling deformation. The results show that as the forming pressure increases, the increments of the area of bottom surface in contact with the die and the maximum thinning rate decrease, and as the sheet thickness increases, the decrement for the area of bottom surface in contact with the die increases, while the decrement for the maximum thinning rate is relatively uniform. When the blank holder length is 60 mm, the area of bottom surface in contact with the die reaches the minimum, and the maximum thinning rate reaches the maximum. The influence of each factor on the area of bottom surface in contact with the die from large to small is forming pressure, sheet thickness, blank holder length, and on the maximum thinning rate is forming pressure, blank holder length, sheet thickness. Buckling deformation is the process of balancing the residual stress inside the formed part, which is inhibited by larger forming pressure and blank holder length.

**Key words:** rubber bladder; aluminum alloy; bulging; forming defects; buckling deformation

橡皮囊成形是飞机蒙皮及其钣金件成形的一种重要方法, 属于橡皮成形, 其原理是利用橡皮囊作为弹性凹(凸)模, 橡皮容框内的液压油作为传压介质, 使板料随着刚性模具成形。橡皮囊成形具有高效、低能耗、污染小和提高零件表面质量的优点, 适用于成形性能差或高强度材料的成形。而在传统

的凹凸模冲压成形中, 由于模具与材料是刚性接触, 工件受到的压力往往分布不均, 导致应力集中, 板料各区域间的应变差距较大, 这样的现象可能会引起局部失稳。橡皮囊成形的优势在于使用柔性介质, 成形过程中工件表面受到的压力分布相对均匀, 极大地缓解了应力集中现象, 而橡皮囊的膨胀作用使材料在各方向上应变相对一致, 有效减小了局部过度变形, 大大提高了贴模精度。因此, 橡皮囊成形在生产中主要用于板料的折弯、翻边等工艺。

橡皮囊液压机在成形唇口形状的过程中可能出

收稿日期: 2024-06-18; 修订日期: 2024-09-27

作者简介: 宋冠华 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1047535642@qq.com

通信作者: 王 辉 (1978-), 男, 博士, 研究员

E-mail: wh508@nuaa.edu.cn

现起皱、裂纹、回弹和屈曲变形等现象, 直接影响零件的成形质量和精度。付云方等<sup>[1]</sup>对橡皮囊成形工艺的基本原理、特点以及发展状况进行了概述。石文勇等<sup>[2]</sup>总结得出, 研究板材成形的方法主要有试验法、解析法和数值分析法。涂集林<sup>[3]</sup>介绍了板料胀形的机理, 将其成形过程分为了两个阶段, 并对这两个阶段的变形过程进行了分析。叶福民等<sup>[4]</sup>采用非线性有限元分析法对复杂飞机舱门内衬板零件的橡皮囊成形过程进行了分析, 总结了动态显示算法和静力隐式算法在处理金属板料成形中的优缺点, 提出了动静联合算法。Wagoner R H 等<sup>[5]</sup>对理想刚性塑性模型分析得出, 弹性模量越低、厚度越薄的材料越容易发生大的回弹, 对成形质量也会产生较大的影响。杨然<sup>[6]</sup>研究了盒型板料的成形, 发现合理的液体压力能在保证成形质量的前提下有效控制成形件的起皱, 使得板料的厚度分布更加均匀, 明显改善成形效果。橡胶材料力学性能的描述方法可以分为两大类: 第1类是将橡胶作为连续介质进行描述和表征, 第2类是将橡胶用热力学统计方法进行描述和表征<sup>[7]</sup>。基于连续介质力学理论的多项式模型, 如 Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型等应用较为广泛。Yeoh 模型可以较好地模拟橡胶材料在大应变(变形量为 150%~300%)中的特性<sup>[8]</sup>。Mooney-Rivlin 模型<sup>[9]</sup>则可较好地模拟小应变和中等应变(变形量小于 150%)时的特性。

本研究使用的材料为 5083-O 铝合金, 采用橡皮囊成形工艺, 使用橡皮囊液压成形机进行拉伸胀形成形。利用 ABAQUS 有限元分析软件对成形过程进行模拟仿真, 探究该工艺中成形压力、板料厚度、压边长度等成形因素对板料成形效果的影响规律以及成形缺陷的形成机理, 并通过橡皮囊成形实验对仿真模型的可行性和可靠性进行验证, 为后续研究金属及合金的成形性能和成形精度提供有效的综合分析方法、仿真模拟指导以及实验参考。

## 1 橡皮囊成形实验与有限元模拟

### 1.1 实验材料的性能测试

实验所用材料为 5083-O 铝合金, 其主要合金元素为镁, 在不可热处理合金中其强度良好, 并具有良好的抗蚀性和焊接性, 被广泛应用于海事用途。5083-O 铝合金的元素质量分数如表 1 所示。

表 1 5083-O 铝合金实测化学成分(%, 质量分数)

Table 1 Measured chemical compositions of 5083-O aluminum alloy(%, mass fraction)

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Zr	Al
0.02	0.07	0.22	0.43	4.48	0.01	0.1	0.02	0.08	余量

根据 GB/T 228.1—2021<sup>[10]</sup> 的金属材料拉伸试验方法, 在厚度为 2 mm 的 5083-O 铝合金板材平面上制取拉伸试样, 通过处理拉伸实验数据可得到真实应力-真实应变曲线, 如图 1 所示。

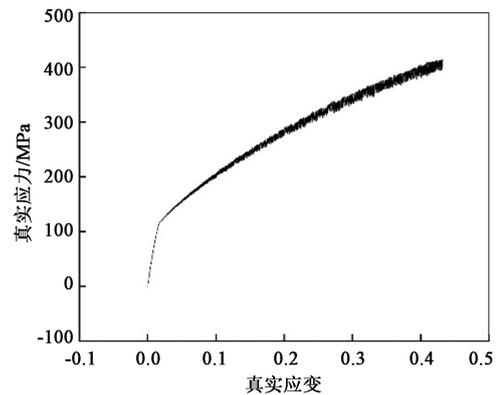


图 1 5083-O 铝合金的真实应力-真实应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curve for 5083-O aluminum alloy

使用 Hollomon 模型来描述铝合金加工硬化现象, 如式(1)所示:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为真实应力;  $K$  为强度系数;  $\varepsilon$  为真实应变;  $n$  为应变硬化指数。

取真实应力-真实应变曲线中开始发生加工硬化(拉伸试样发生较均匀塑性变形的阶段)到真实应力达到最大值之间的数据, 利用式(1)分别取对数。以  $\ln\varepsilon$  数据为横坐标、 $\ln\sigma$  数据为纵坐标, 在 MATLAB 中进行拟合, 得到的直线的斜率即为应变硬化指数  $n$ 。

5083-O 铝合金材料的力学性能如表 2 所示。

表 2 5083-O 铝合金材料参数

Table 2 Material parameters of 5083-O aluminum alloy

参数	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	杨氏模 量/MPa	泊松比	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	应变硬化 指数 $n$	断后伸长 率/%
数值	2.66	71000	0.33	213	414	0.40	$\leq 30$

实验所使用的材料为氟橡胶, 其力学性能处于橡胶的中等水平, 断后伸长率约为 150%~300%, 弹性适中<sup>[11]</sup>, 因此, 使用 Mooney-Rivlin 模型最合适。在 Mooney-Rivlin 理论中, 将橡胶作为一种超弹

性材料,本构关系一般可用应变能密度函数加以表征和描述,其应力与应变之间是非线性的关系,体积是近似不可压缩的且在受力变形之前满足各向同性。周鸿嘉<sup>[12]</sup>对 Mooney-Rivlin 理论模型与橡胶的力学特性结合进行推算得出式(2):

$$\frac{\sigma'}{2\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right)} = C_{10} + \frac{1}{\lambda} C_{01} \quad (2)$$

式中: $\sigma'$ 为工程应力; $\lambda$ 为主伸长率; $C_{10}$ 和 $C_{01}$ 为 Rivlin 系数,均为正定常数。

将式(2)中的 $\frac{\sigma'}{2\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right)}$ 看作 $y$ 、 $\frac{1}{\lambda}$ 看作 $x$ ,则

式(2)即可看作一条直线,其斜率为 $C_{01}$ ,纵截距为 $C_{10}$ ,将此公式应用至橡胶单向拉伸实验数据处理中,拟合不同拉伸速率下的曲线,统一截取横坐标 $\frac{1}{\lambda}$ 处于0.6左右的数据,再次拟合数据为一条直线,获得氟橡胶的 $C_{10}$ 和 $C_{01}$ 的数值。

计算得到的橡皮囊材料参数如表3所示。

表3 橡皮囊材料参数

Table 3 Material parameters of rubber sacs

材料模型	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	$C_{10}$	$C_{01}$
Mooney-Rivlin	1.32	0.736	0.184

## 1.2 零件成形原理

整个成形过程分为两个阶段:第1个阶段为切割椭圆形板料,如图2所示,使用橡皮囊成形机对其施加压力直至板料与模具底面接触,此阶段包括胀形变形和拉伸变形,板料中心由于没有模具的支撑,受到橡皮囊压力后会形成由中心到四周变形程度逐渐递减的情况,这个变形程度较小,属于胀形变形,随着橡皮囊继续施加压力,板料中心会率先到达模具底部,拉伸变形主导这个阶段;第2个阶段为橡皮囊继续膨胀充满整个模具,板料被挤压覆盖在模具表面,这个变形过程是由率先达到模具底部的板料从中心逐渐向四周扩散,属于胀形变形。在使用橡皮囊进行胀形成形的过程中,由于橡皮囊压力过大,阻止了板料边缘的材料向中心流动,会出现过多的减薄,致使板料的中心区域,即与模具盆腔底部接触的部分容易出现破裂的迹象。由于板料在橡皮囊成形过程中底面部分和侧壁发生胀形变形,因此,法兰内径受到拉应力作用,在成形过程中法兰表面因受到橡皮囊的压力作用而保持平整,

但当压力卸载后,法兰处的板料将发生回弹,沿着周向屈曲变形,成形缺陷区域<sup>[13]</sup>如图3所示。

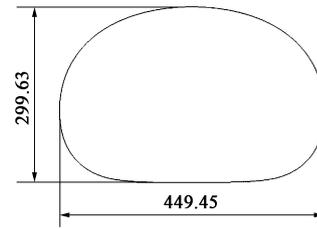


图2 板料尺寸图

Fig. 2 Dimensions of sheet

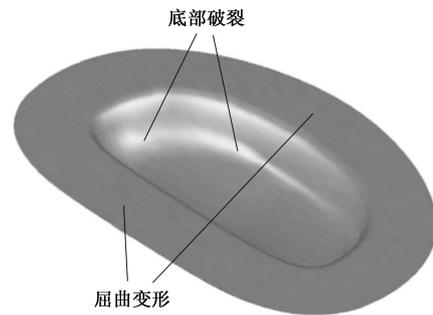


图3 零件成形缺陷

Fig. 3 Forming defects for part

## 1.3 有限元模型的建立与仿真方案

装配体包括橡皮囊、板料和模具3个部分,其中,模具和板料模型在CATIA中完成建模。在模拟成形过程中,认定橡皮表面受压均匀,不考虑橡皮囊整体变形,因此,将橡皮囊的结构进行简化<sup>[14]</sup>,整体模型如图4所示。

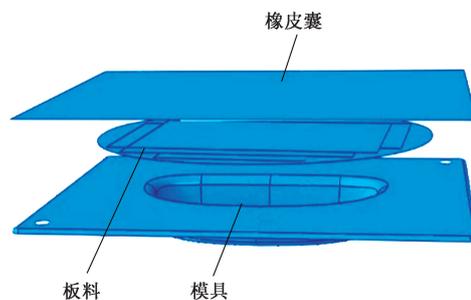


图4 橡皮囊成形有限元模型

Fig. 4 Finite element model of rubber bladder forming

实验设置多个变量,分别为成形压力、板料厚度和压边长度,研究其对成形效果的影响。其中,成形压力为橡皮囊赋予板料垂直于表面的向下压力;板料厚度为板料上表面与下表面的距离;压边长度为板料最外侧轮廓与模具型腔边缘的平均距离,代表板料被橡皮囊压边的程度。仿真方案如表4所示。

表 4 橡皮囊成形仿真方案

Table 4 Simulation scheme of rubber bladder forming

工艺参数	数值
板料厚度/mm	1.5、2.0、2.5、3.0
成形压力/MPa	5、10、15、20
压边长度/mm	20、40、60、80

1.4 有限元模型边界条件与载荷建立

模具设置为离散刚体，网格尺寸为 27 mm，自由划分三角形网格；板料设置为壳体，赋予材料属性时设置厚度，网格尺寸为 10 mm，网格单元形状以四边形为主；橡皮囊设置为壳体，厚度为 80 mm，结构为四边形网格，几何阶次为二次，采取缩减积分。设置通用接触，切向罚摩擦因数为 0.3，方向为各向同性。采用非线性动态显示算法；对模具进行完全固定约束；在橡皮囊上表面设置压强。

1.5 橡皮囊成形实验验证

实验采用 QUINTUS 橡皮囊液压成形机，型号为 QFC 0.7×1.8-1400，最大单位压力为 140 MPa，总质量为 40 t。板料表面先进行电化学腐蚀处理，印

制圆点网格，成形后使用 Argus 光学应变测量系统计算得到应变值。实验方案如表 5 所示。

表 5 橡皮囊成形工艺实验方案

Table 5 Experimental scheme of rubber bladder forming

参数	成形压力/MPa	板料厚度/mm	压边长度/mm
数值	10	1.5、2.0、2.5、3.0	60

2 结果分析

由于板料成形后底面贴模的形状为类似椭圆的不规则形状，因此，在板料面的纵向量取最远两点的直线距离，记为长轴长度；在板料面的横向量取最远两点的直线距离，记为短轴长度。短轴要与长轴相互垂直，通过将长轴与短轴相乘得到其内接长方形的面积，最大程度表达板料底面贴模的不规则形状的面积。

2.1 各项参数单因素对成形效果的影响

依据仿真结果分别绘制各因素对最大减薄率与底面贴模面积的影响图，如图 5 所示。

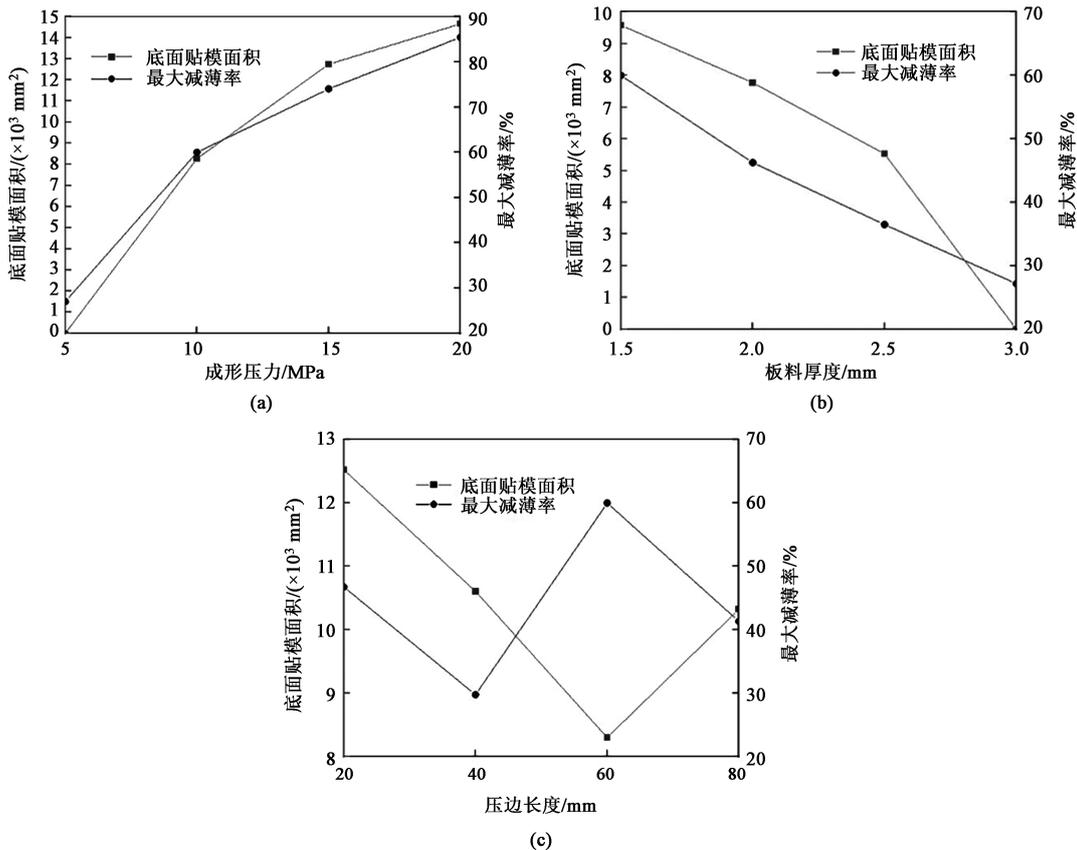


图 5 不同因素对板料成形后底面贴模面积与最大减薄率的影响

(a) 成形压力 (b) 板料厚度 (c) 压边长度

Fig. 5 Influence of different factors on area of bottom surface in contact with die and maximum thinning rate after sheet forming

(a) Forming pressure (b) Sheet thickness (c) Blank holder length

如图 5a 所示, 此时板料厚度均为 2 mm、压边长度均为 60 mm。对比不同成形压力下板料的成效数据, 当成形压力由 10 MPa 增加至 15 MPa 时, 底面贴模面积的增加量仅为成形压力由 5 MPa 增加至 10 MPa 时的 53.97%, 最大减薄率的增加量为 42.48%; 当成形压力由 15 MPa 增加至 20 MPa 时, 底面贴模面积的增加量为成形压力由 10 MPa 增加至 15 MPa 时的 42.85%, 最大减薄率的增加量为 81.37%; 当成形压力超过 15 MPa 时, 底面贴模面积的增幅明显减小, 而底面最大减薄率会接近甚至超过 80%。

如图 5b 所示, 此时成形压力均为 10 MPa、压边长度均为 60 mm。随着板料厚度的增加, 最大减薄率减小的幅度较为均匀, 而底面贴模面积在板料

厚度小于 2.5 mm 时的减小幅度较为均匀, 在板料厚度由 2.5 mm 增加至 3.0 mm 时, 其减小量是板料厚度由 2 mm 增加至 2.5 mm 时的 246%; 当板料厚度为 3 mm 时, 底面贴模面积为 0。

如图 5c 所示, 此时成形压力均为 10 MPa、板料厚度均为 2 mm。随着压边长度的增加, 成形后板料的底面贴模面积先减小后增大, 而最大减薄率的变化较为复杂。在压边长度为 60 mm 时, 底面贴模面积达到了最小, 此时最大减薄率达到了最大。在压边长度为 40 mm 时, 底面贴模面积要比压边长度为 80 mm 时的大, 此时的最大减薄率是最小的。

## 2.2 各项参数对成形效果的影响程度

设计的正交实验表为  $L_{16}(4^3)$ , 结果如表 6 所示。

表 6 正交实验结果

Table 6 Results of orthogonal experiments

编号	板料厚度/ mm	成形压力/ MPa	压边长度/ mm	板料底面最大 减薄率/%	底面贴模短轴 长度/mm	底面贴模长轴 长度/mm	底面贴模面积/ mm <sup>2</sup>
1	1.5	5	20	12.20	49.24	100.34	4940.74
2		10	40	29.73	69.87	151.77	10604.17
3		15	60	73.99	65.64	194.01	12734.82
4		20	80	59.28	65.90	198.53	13083.13
5	2.0	5	40	10.85	0.00	0.00	0.00
6		10	20	21.05	68.94	151.00	10409.94
7		15	80	43.75	65.98	188.60	12443.83
8		20	60	80.93	71.00	193.66	13749.86
9	2.5	5	60	34.76	0.00	0.00	0.00
10		10	80	43.36	0.00	0.00	0.00
11		15	20	23.72	78.77	161.07	12687.48
12		20	40	40.68	70.42	202.00	14224.84
13	3.0	5	80	4.63	0.00	0.00	0.00
14		10	60	27.17	0.00	0.00	0.00
15		15	40	19.53	59.86	141.40	8464.20
16		20	20	56.10	49.32	100.34	4948.77

运用极差法对表 6 中的仿真结果进行数据分析, 其中  $R$  为极差, 表示各个因素下最大减薄率差值的最大值, 能够反映各个因素对减薄率的影响程度,  $R$  值越大, 则该因素影响程度越大。如表 7 所示,  $R1$  为最大减薄率的极差,  $R2$  为最大底面贴模面积的极差。可见对板料最大减薄率的影响程度为: 成形压力 > 压边长度 > 板料厚度; 对板料底面贴模面积的影响程度为: 成形压力 > 板料厚度 > 压边长度。

表 7 极差分析结果

Table 7 Range analysis results

极差	因素		
	板料厚度	成形压力	压边长度
$R1/\%$	16.94	43.64	29.01
$R2/\text{mm}^2$	6987.48	10347.39	1941.56

## 2.3 屈曲变形的成因及改善

如图 6a 所示, 从等效应力分布云图上观察板料

四周的应力分布规律发现, 在板料非变形区分布着很多或大或小的残余应力, 同时也存在应力集中的现象。所以, 图 6b 上板料边缘处会出现凹凸不平的波浪外形, 原本平整的整个板面变成曲面, 对于这种情况, 即使在表面施加更均匀的压力也无法完全消除。宏观表现如图 7 所示, 虽然成形零件的波纹形状不会被很明显地观察到, 但是将成形零件倒

放置于水平的桌面上可以发现, 板料边缘无法与桌面完全贴合。其成因为成形过程中非变形区板料表面受到橡皮囊的压力保持平衡平整, 而板料在压力卸载后由于内部存在残余应力而处于失稳状态, 为了达到新的平衡, 在残余应力<sup>[15]</sup>的作用下, 内径收缩发生回弹并沿着周向发生变形, 使板料周边发生翘曲, 使得平整的板料变得弯曲。

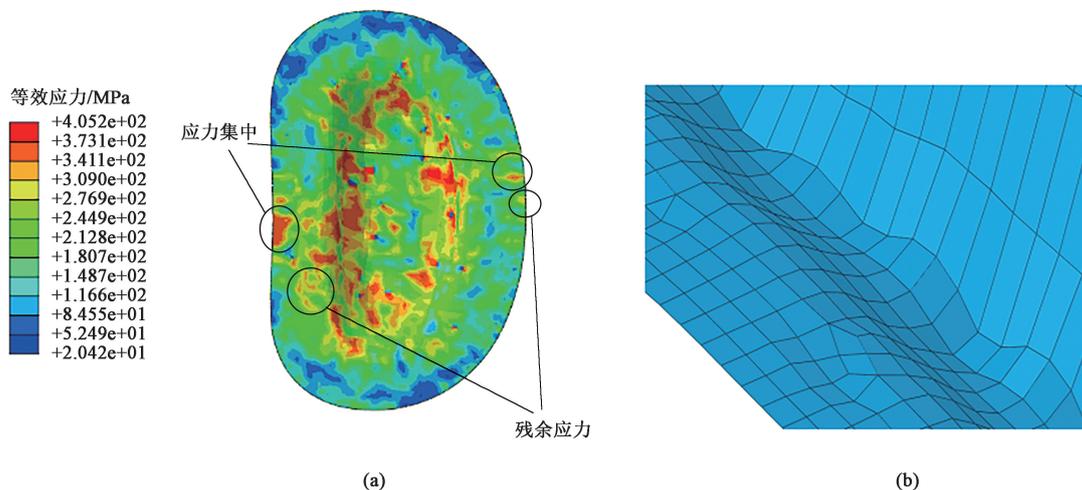


图 6 等效应力分布云图 (a) 与屈曲变形仿真云图 (b)

Fig. 6 Equivalent stress distribution nephogram (a) and buckling deformation simulation nephogram (b)



图 7 成形件局部图

Fig. 7 Partial diagram of formed part

图 8 为不同参数对屈曲变形最大高度的影响, 分别固定成形压力、板料厚度和压边长度中的两个参数 (成形压力为 10 MPa、板料厚度为 2 mm、压边长度为 60 mm), 调整另一个参数。可见, 成形压力和压边长度可以有效控制零件的屈曲变形, 但板料厚度对控制屈曲变形的影响不明显; 成形压力越大, 压边长度越大, 屈曲变形的最大高度越小, 就可以更好地抑制屈曲变形。

#### 2.4 仿真结果准确度和可靠性验证

测量 4 组橡皮囊成形后成形件底面平面的长轴

和短轴长度, 将其与仿真对应数据进行对比, 如表 8 所示; 在成形面上随机选取同一路径, 按路径长度均匀截取节点, 对比仿真和实验零件各节点的等效应变值, 如表 9 所示。将两个表格数据绘制为图 9, 可以发现, 长轴和短轴的测量值总是小于仿真值, 分析是手工测量的误差导致的, 但整体平均误差小于 10%; 同一路径下仿真和实验的数据误差小于 10%; 验证了基于 ABAQUS 有限元软件模拟橡皮囊成形的可行性与可靠性。

### 3 结论

(1) 随着成形压力的增大, 底面贴模面积和最大减薄率的增幅明显减小, 其中成形压力每增加 5 MPa, 底面贴模面积增幅减小接近 50%, 成形压力由 5 MPa 增加至 20 MPa, 最大减薄率增加了 216%; 板料厚度越大, 底面贴模面积的减小幅度逐渐变大, 但最大减薄率的减小幅度较为均匀, 板料厚度由 1.5 mm 增加至 3.0 mm, 最大减薄率减小了 54.7%; 压边长度越大, 底面贴模面积先减小后增大, 最大减薄率在底面贴模面积最小时达到最大。

(2) 通过正交实验得出, 对板料最大减薄率的影响程度顺序为: 成形压力>压边长度>板料厚度; 对板

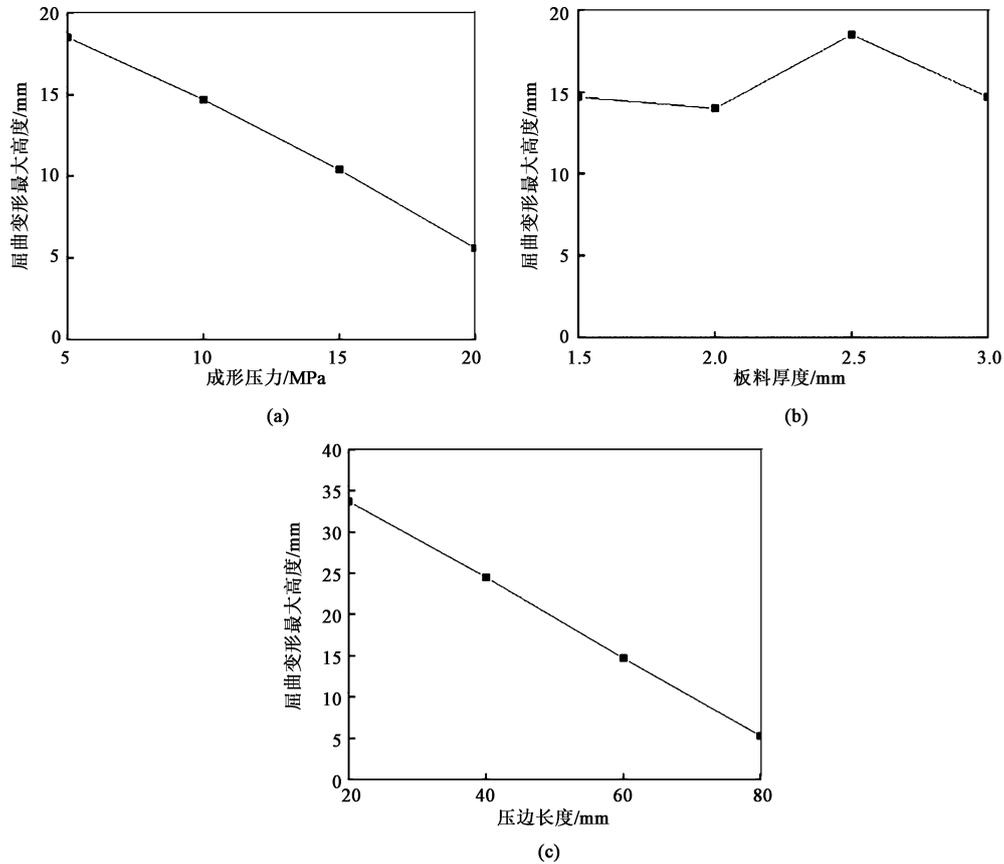


图 8 不同因素对屈曲变形最大高度的影响

(a) 成形压力 (b) 板料厚度 (c) 压边长度

Fig. 8 Influence of different factors on maximum height of buckling deformation

(a) Forming pressure (b) Sheet thickness (c) Blank holder length

表 8 长轴和短轴长度的仿真与实验结果对比

Table 8 Comparison of long-axis and short-axis lengths between simulation and experimental results

编号	板料厚度/mm	成形压力/MPa	压边长度/mm	长轴长度/mm		短轴长度/mm	
				仿真结果	实验结果	仿真结果	实验结果
1#	1.5			158.9	145	59.0	55
2#	2.0	10	60	139.1	130	55.9	52
3#	2.5			99.5	95	55.5	51
4#	3.0			0.0	0	0.0	0

表 9 同一路径下各节点的等效应变值 (%)

Table 9 Equivalent strain values of each point under the same path (%)

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
模拟值	6.33	2.64	3.07	4.91	6.11	5.89	4.79	5.76	5.00	2.93	1.90	5.09	4.73
实验值	6.74	2.61	3.28	4.92	6.37	6.41	5.20	5.71	4.81	2.81	1.95	5.35	4.98

料底面最大贴模面积的影响程度顺序为：成形压力>板料厚度>压边长度。

(3) 翘曲过程是板料内部从旧平衡达到新平衡的过程，屈曲变形是板料达到新平衡的结果；较大

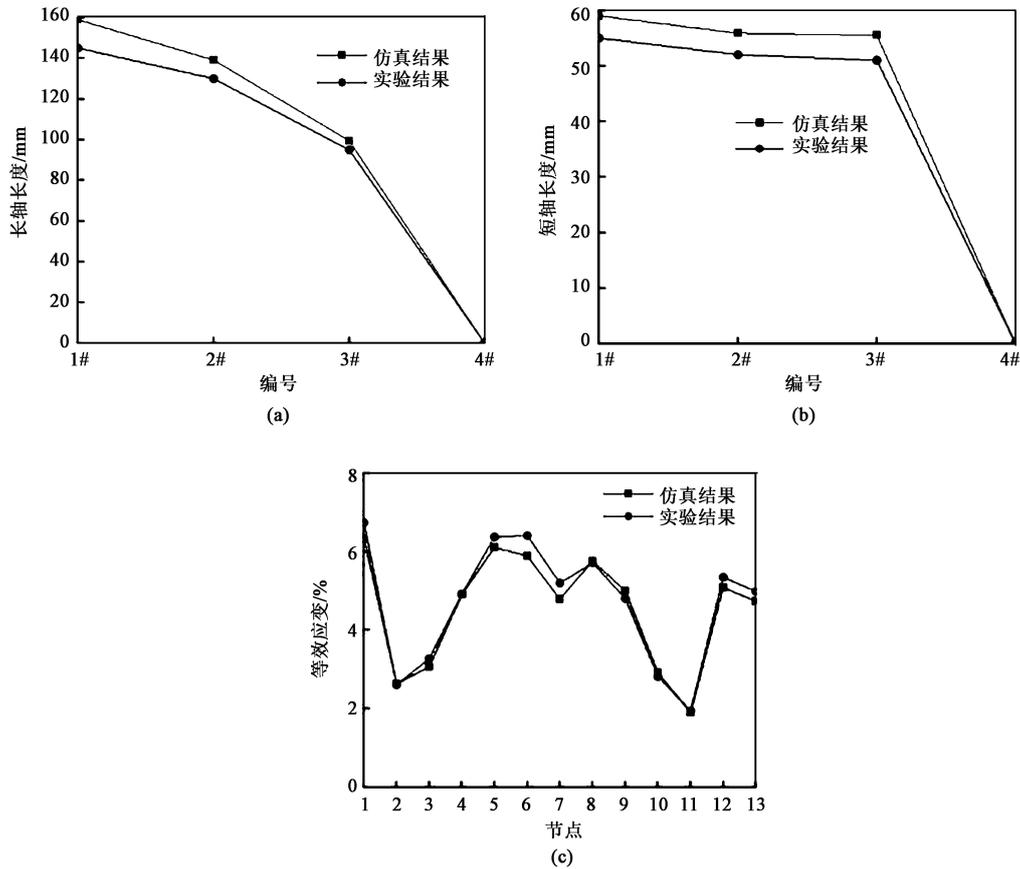


图9 仿真数据与实验实测结果对比图

(a) 长轴长度 (b) 短轴长度 (c) 同路径等效应变

Fig.9 Comparison diagrams of simulation data and experimental results

(a) Lengths of long-axe (b) Lengths of short-axe (c) Equivalent strains of the same path

的成形压力和压边长度可以有效抑制板料的屈曲变形，板料厚度的变化对屈曲变形的影响不大。所以，在不发生破裂的前提下，增大成形压力，增大压边长度，可以有效抑制成形板料的屈曲变形。

参考文献：

[1] 付云方, 高霖, 王辉. 橡皮囊成形的研究进展 [J]. 中国制造业信息化, 2009, 38 (7): 59-63, 66.  
 Fu Y F, Gao L, Wang H. A review of the research on rubber bladder forming [J]. China Manufacturing Information Technology, 2009, 38 (7): 59-63, 66.  
 [2] 石文勇, 马岩, 李哲. 板材柔性介质加压成形技术的研究现状 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21 (5): 7-12, 19.  
 Shi W Y, Ma Y, Li Z. Research status on the sheet flexible medium forming technology [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21 (5): 7-12, 19.  
 [3] 涂集林. 铝合金薄板橡皮囊液压成形屈曲机理与控制 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.  
 Tu J L. Buckling Mechanism and Control of Aluminum Alloy Sheet

Rubber Bag by Hydroforming [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.  
 [4] 叶福民, 朱如鹏, 李靖谊. 多工步橡皮成形工艺过程数值模拟研究 [J]. 机械科学与技术, 2007 (10): 1286-1289.  
 Ye F M, Zhu R P, Li J Y. Numerical simulation of multi-step rubber forming process [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007 (10): 1286-1289.  
 [5] Wagoner R H, Wang J F, Li M. Springback [M]. Ohio: ASM International, 2006.  
 [6] 杨然. 内凹底盒形件充液拉深工艺数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.  
 Yang R. Numerical Simulation of Liquid-filled Deep Drawing Process for Cavity Bottom Box Parts [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.  
 [7] 卜继玲, 黄友剑. 轨道车辆橡胶弹性元件设计计算方法 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.  
 Bu J L, Huang Y J. Design and Calculation Method of Rubber Elastic Elements of Railway Vehicles [M]. Beijing: China Railway Press, 2010.  
 [8] Yükseler R F. Local and nonlocal buckling of mooney-rivlin rods

- [ J ]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2019, 78: 103816.
- [ 9 ] 王福东. 大曲率凸弯边零件橡皮囊液压成形工艺研究 [ D ]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
Wang F D. Research on Hydroforming Process of Rubber Bag for Large Curvature Convex and Curved Edge Parts [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [ 10 ] GB/T 228. 1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [ S ].  
GB/T 228. 1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [ S ].
- [ 11 ] 陈春明. 氟橡胶的改性及其纳米尺度互穿网络形态研究 [ D ]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.  
Chen C M. Study on Modification of Fluorine Rubber and Morphology of Nanoscale Interpenetrating Network [ D ]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [ 12 ] 周鸿嘉. 铝合金 5182 温热橡皮成形工艺研究 [ D ]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.  
Zhou H J. Research on Forming Process of Aluminum Alloy 5182 Warm Rubber [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [ 13 ] 杨亮, 陈永悦, 王有龙. 燃料电池金属双极板冲压成形及减薄率研究 [ J ]. 锻压技术, 2023, 48 ( 4 ): 56-65.  
Yang L, Chen Y Y, Wang Y L. Research on stamping and thinning rate for fuel cell metal bipolar plate [ J ]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 ( 4 ): 56-65.
- [ 14 ] 刘垒, 孙志宏, 庄璐玮, 等. 基于 PAM-STAMP2G 的钛合金钣金零件橡皮囊成形有限元模拟 [ J ]. 机械制造与自动化, 2016, 45 ( 4 ): 84-86, 103.  
Liu L, Sun Z H, Zhuang L W, et al. Rubber bladder forming for titanium alloy sheet metal parts based on PAM-STAMP2G finite element simulation [ J ]. Machine Building & Automation, 2016, 45 ( 4 ): 84-86, 103.
- [ 15 ] 王鹏. 金属材料塑性变形行为的理论研究: 失效、稳态与稳定性 [ D ]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
Wang P. Theoretical Study on Plastic Deformation Behavior of Metal Materials: Failure, Steady State and Stability [ D ]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

