

基于 Dynaform 的球底筒形件充液成形回弹有限元模拟

张泉达¹, 孙福臻¹, 吉日格勒¹, 王 耀²

(1. 中国机械科学研究总院集团有限公司 先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044;
2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

摘要: 基于 Dynaform 模拟仿真, 针对球底筒形件, 以液室压力、压边力、凸模与板料之间的摩擦系数和成形高度为因素开展正交试验研究, 分析不同条件下零件的壁厚变化和回弹规律。结果表明: 通过充液成形制备球底筒形件可以实现低拉深系数成形, 拉深系数可达 0.42, 零件形状良好, 无开裂、起皱; 影响零件减薄率的主要因素为液室压力、压边力和摩擦系数, 影响最大回弹量的主要因素为成形高度。最终确定优化参数组合为: 液室压力为 50 MPa、压边力为 20 kN、摩擦系数为 0.05、成形高度为 50 mm, 该参数组合下零件的减薄率低、回弹量小, 满足设计要求。相较于平底筒形件, 在参数相同的条件下, 两者的回弹量相近, 但球底筒形件的厚度分布更均匀, 有利于材料的充分利用。

关键词: 球底筒形件; 充液成形; 回弹; 减薄率; 正交试验

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.036

中图分类号: TG394 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 05-0275-07

Finite element simulation on springback during hydroforming for cylindrical parts with spherical bottom based on Dynaform

Zhang Quanda¹, Sun Fuzhen¹, Ji Rigele¹, Wang Yao²

(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Based on the simulation by Dynaform, for the cylindrical parts with spherical bottom, taking liquid chamber pressure, blank holder force, friction coefficient between punch and blank and forming height as the factors, the wall thickness change and the springback rule of parts under different conditions were studied by the orthogonal test. The results show that the cylindrical parts with spherical bottom by hydroforming can achieve the forming at low tensile coefficient, which can reach 0.42, and the parts get good shape without cracking and wrinkling. The main factors affecting the thinning rate of parts are liquid chamber pressure, blank holder force and friction coefficient, and the main factor affecting the maximum amount of springback is forming height. Finally, the optimization combination of parameters is determined as the liquid chamber pressure of 50 MPa, the blank holder force of 20 kN, the friction coefficient of 0.05 and the forming height of 50 mm. Under this parameter combination, the thinning rate of parts is low and the amount of springback is small which can meet the design requirements. Compared with the cylindrical parts with flat bottom, under the same parameter conditions, the two have similar amounts of springback, but the thickness distribution of cylindrical parts with spherical bottom is more uniform, which is conducive to the full use of materials.

Key words: cylindrical parts with spherical bottom; hydroforming; springback; thinning rate; orthogonal test

由于轻量化技术在节能减排和绿色制造方面的巨大应用潜力, 其成为航空航天、轨道交通以及汽车行业的重点研究对象^[1-2]。实现轻量化主要有 3

种手段, 即轻量化材料、轻量化结构以及轻量化制造技术。铝合金充液成形结合了铝合金比强度高、抗冲击性能强、抗腐蚀性好的轻质材料优势和充液成形模具成本低、成形精度高的成形优势, 适合于高精度、复杂零部件的成形制造^[3-8]。

国内外学者已经对铝合金充液成形开展了广泛研究。冯瑶等^[9]采用 5182 铝合金对汽车引擎盖内板充液成形开展了研究, 利用仿真模拟软件分析零件缺陷, 有效解决了成形过程中出现的起皱和破裂等缺陷, 实现了目标零部件的工程化应用。杨声伟

收稿日期: 2023-03-03; 修订日期: 2023-05-10

基金项目: 中国机械科学研究总院集团有限公司技术发展基金
(2021110032020656)

作者简介: 张泉达 (1986-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: zhangquandadgu@163.com

通信作者: 吉日格勒 (1991-), 男, 硕士, 助理工程师

E-mail: jirigele678@163.com

等^[10]针对航天火箭整流罩开展了充液成形研究,采用 2 系铝合金,通过数值模拟分析与试验验证,证明数值模拟可以有效指导试验,具备较高的准确性。毕海娟等^[11]以航天运载火箭用铝合金椭球瓜瓣构件产品为研究对象,通过理论计算、软件辅助等手段,开发了一套可实现两种材质、8 种规格的椭球瓜瓣构件制造的充液成形模具。李晓光等^[12]针对外凸型变曲率内锥体深腔曲面高温合金构件成形难度较高的技术难题,采用充液成形,通过有限元分析并结合试验,获得最佳的成形工艺参数。曾一畔等^[13]针对铝合金航空复杂薄壁构件,采用主动式充液成形,研究了不同加载路径对零件成形性能的影响,结果显示加载路径对零件的成形性能影响较大,在梯形脉动加载路径下,零件壁厚及减薄率的控制效果最佳。

国内外学者针对 2 系和 5 系铝合金充液成形的研究较多,但针对 7 系高强铝合金在充液成形方面的研究鲜有报道。7 系铝合金相较其他系列铝合金具有比重小、强度高、加工性能好的优势,在轻量化应用方面具备更好的应用潜力,已在航空航天等领域被广泛应用。但是,由于 7 系铝合金的成形性差,限制了其在汽车等领域的进一步应用。周国伟等^[14]针对 7075 铝合金的拉深成形性能开展研究,结果显示,7075-T6 铝合金的拉深成形性能很差,拉深系数 m 仅为 0.8 ($m=d/D'$, 其中, d 为筒径, D' 为坯料直径。)。充液成形由于具有“摩擦保持”和“流体润滑”特性,可以有效改善 7 系铝合金的成形性能,有必要针对 7 系铝合金充液成形开展系统性研究。本文基于 Dynaform 和正交试验,针对典型零部件球底筒形件开展研究,以液室压力、压边力、摩擦因数和成形高度为研究因素,通过数值模拟分析不同条件下零件的壁厚变化和回弹规律。

1 数值模拟模型构建

1.1 材料和模具模型构建

球底筒形件选用 7075-T6 铝合金,球底直径为 $\Phi 100$ mm,厚度 t 为 1.5 mm,材料性能参数如表 1 所示。由于工件为球底形状,拉伸后易产生回弹。

材料模型采用不考虑厚向异性的 36 号弹塑性模型。凸、凹模及压边圈为无变形刚性体,板料与凸、凹模及压边圈之间的接触类型为单面接触,压边圈与板材之间为库伦摩擦,摩擦因数 $\mu = 0.18$ 。液体压力加载区域为凹模圆角以内的区域^[15]。

表 1 7075-T6 铝合金的材料性能参数

Table 1 Material performance parameters of 7075-T6 aluminium alloy

参数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	各向异性 参数
数值	2850	71.7	0.33	502	0.67

根据零件形状构建充液成形模具用于模拟仿真,如图 1 所示。模具各部分的尺寸分别为:凸模直径为 $\Phi 100$ mm、凹模内径为 $\Phi 103.3$ mm、凹模圆角半径为 8 mm、压边圈内径为 $\Phi 105$ mm、压边圈圆角半径为 8 mm。采用不同液室压力、压边力、摩擦因数和成形高度,研究不同参数组合下球底筒形件的成形回弹性能。

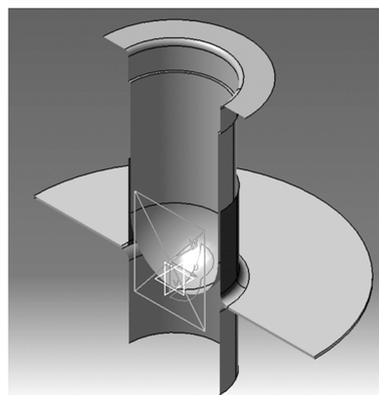


图 1 球底筒形件成形模具

Fig. 1 Forming die of cylindrical part with spherical bottom

根据零件展开,估算坯料为直径为 $\Phi 220$ mm 的圆板,厚度 t 为 1.5 mm。压料面采用边界线压料面,边距取 50 mm,向下移动 2 mm。如图 2 所示,采用被动式充液成形,成形过程包括充液成形、修边和回弹 3 个模拟工步。成形前,压边圈首先向下运动,与凹模贴合并压紧坯料,然后凸模向下运动,

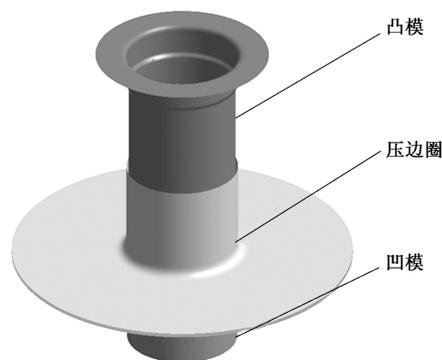


图 2 各成形工具定位设置

Fig. 2 Position setting of each forming tool

与液室压力共同完成零件的充液成形。将成形后的工件切边，以底部中心点位置作为节点约束位置，测量工件的成形和回弹性能。

1.2 网格模型构建

通过加密网格，可以更加准确地描述零件模型，结构分析的准确性更高，收敛性更好。由于球底筒形件的形状较为规则，采用计算精度更高的四边形网格，应用自适应网格划分。成形过程中，变形集中于板料和凸模。模具可以视为刚体，不发生变形，选择刚性六面体单元进行离散化处理，网格尺寸介于 3~10 mm 之间。板料选择适用于回弹分析的 Fully-Integrated 壳单元，自适应网格划分并对局部区域进行加密处理，为提高网格质量，将板料网格划分更细，网格尺寸为 2 mm。

2 正交试验设计

为了研究不同因素对球底筒形件成形回弹性能的影响，采用正交试验开展相关研究。以最大减薄、最大回弹、开裂和起皱为评价球底筒形件整体成形质量的指标。充液成形工艺中采用液室压力配合凸模等工具完成工件成形，由于存在“摩擦保持”和“流体润滑”效果，零件成形回弹性能的影响因素同传统拉

深成形存在差别，受液室压力、凸模与板料之间的摩擦因数、压边力和成形高度等因素的影响。本研究以液室压力、摩擦因数、压边力和成形高度为主要影响因素，开展 4 因素 3 水平标准正交试验，如表 2 所示，对球底筒形件充液成形进行正交试验研究。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	液室压力 <i>A</i> /MPa	压边力 <i>B</i> /N	摩擦因数 <i>C</i>	成形高度 <i>D</i> /mm
1	20	200000	0.05	50
2	35	400000	0.10	65
3	50	600000	0.15	80

根据零件的工艺要求，合格零件需满足以下几方面要求：(1) 零件区域无起皱、开裂现象；(2) 零件的最大减薄率小于 17%；(3) 最大回弹量小于 1.8 mm。本研究以最大减薄率和最大回弹量为考察指标，结合表面质量分析，对试验结果进行极差分析。试验方案及模拟结果及结果分析如表 3 和表 4 所示。其中， $k_1 \sim k_3$ 为评价指标在某因素 j ($j=1, 2, 3$) 同一水平下的试验结果之和， $K_1 \sim K_3$ 为评价指标在某因素 j ($j=1, 2, 3$) 同一水平下的试验结果的平均值。

表 3 正交试验方案及结果

Table 3 Schemes and results of orthogonal test

序号	因素				指标			
	液室压力 <i>A</i> /MPa	压边力 <i>B</i> /N	摩擦因数 <i>C</i>	成形高度 <i>D</i> /mm	最大减薄率/%	最大回弹量/mm	是否开裂	是否起皱
1	20	200000	0.05	50	16.19	1.58	否	否
2	20	400000	0.10	65	23.23	1.84	否	否
3	20	600000	0.15	80	66.10	2.25	是	否
4	35	200000	0.10	80	15.61	2.26	否	否
5	35	400000	0.15	50	23.54	1.55	否	否
6	35	600000	0.05	65	15.75	1.93	否	否
7	50	200000	0.15	65	15.31	1.99	否	否
8	50	400000	0.05	80	13.57	2.36	否	否
9	50	600000	0.10	50	19.82	1.65	否	否

3 结果分析及工艺优化

由模拟仿真结果可知，不同工况下均未出现起皱缺陷，其原因在于球底筒形件的底部受力更加均匀，材料流动更加充分。方案 3 下，工件发生开裂，

结合成形极限图 (图 3) 分析可知，裂纹出现在成形初期，分布在侧壁位置，开裂的主要原因是压边力、摩擦因数设置偏大，导致凸缘材料无法顺利流入来及时补充减薄区域，导致侧壁减薄严重，发生开裂。

为了进一步分析不同影响因素对球底筒形件成

表 4 正交试验结果分析

Table 4 Analysis on orthogonal test results

指标	k 值和 K 值	A	B	C	D
最大减薄率/%	k_1	105.52	47.11	45.51	59.55
	k_2	54.90	60.34	58.66	54.29
	k_3	48.70	101.67	104.95	95.28
	K_1	35.17	15.70	15.17	19.85
	K_2	18.30	20.11	19.55	18.10
	K_3	16.23	33.89	34.98	31.76
	极差 R	18.94	18.19	19.81	13.66
	因素主次	$C>A>B>D$			
	优选组合	A3B1C1D2			
	最大回弹量/mm	k_1	5.67	5.83	5.87
k_2		5.74	5.75	5.75	5.76
k_3		6.00	5.83	5.79	6.87
K_1		1.89	1.94	1.96	1.59
K_2		1.91	1.92	1.92	1.92
K_3		2.00	1.94	1.93	2.29
极差 R		0.11	0.03	0.04	0.70
因素主次		$D>A>C>B$			
优选组合		A1B2C2D1			

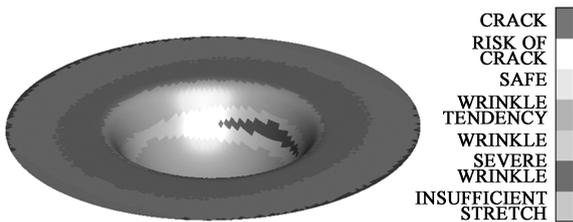


图 3 方案 3 的成形极限图

Fig. 3 Forming limit diagram of scheme 3

形的影响规律,对正交试验结果进行分析整理。从表 4 的分析结果可知,影响球底筒形件最大减薄率的因素排序为摩擦因数、液室压力、压边力和成形高度,最优组合为 A3B1C1D2;影响零件最大回弹量的因素排序为成形高度、液室压力、摩擦因数和压边力,最佳组合为 A1B2C2D1。对两个指标来说,最佳组合中各影响因素的水平均不相同,其中液室压力对于最大减薄率和最大回弹量在影响因素主次顺序中均排在第 2 位。但对于最大减薄率指标,增大液室压力有利于降低减薄率,这主要是因为充液成形替代了传统凹模,使工件受力更加均匀,减少因局部应力集中而造成的减薄,从而降低最大减薄率;对于最大回弹量指标,降低液室压力有利于减少回弹量,其原因在于液室压力增大导致法兰区域材料流动减少,变形不充分,导致回弹量增大。成形高度对减薄率和回弹量的作用程度完全相反,在

最大减薄率影响因素主次顺序中排在最后,在最大回弹量影响因素主次顺序中排第 1 位,其主要原因在于充液成形独特的“摩擦保持”和“流体润滑”效果,使得零件在成形过程中各部分变形更加均匀,配合球底筒形件均匀的底部受力,使得充液成形过程中成形高度对最大减薄率的影响降低。与此同时,由于上述作用使得零件整体变形更加均匀,塑性成形更加充分,凸缘部分由于更多材料流入而导致周向应力增大、回弹增大,因此,不同成形高度之间的回弹差别大。通过图 4 极差分析可知,对于最大减薄率指标,4 个影响因素中成形高度的影响程度远低于其他 3 个因素。对于最大回弹量指标,不同因素的影响程度如图 5 所示,其中,成形高度的影响程度远大于其他 3 个因素,其他 3 个因素对最大回弹量的影响程度相当。综合以上分析,最佳组合为 A3B1C1D1。

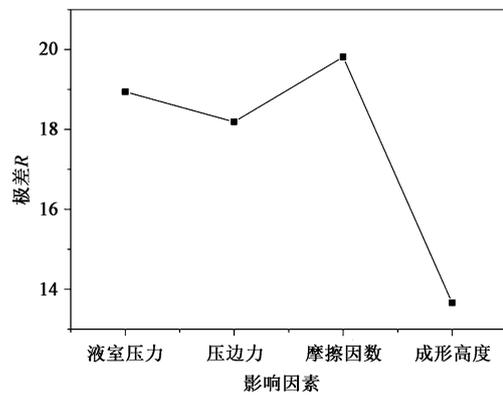


图 4 各因素对最大减薄率的影响程度

Fig. 4 Influence degree of various factors on maximum thinning rate

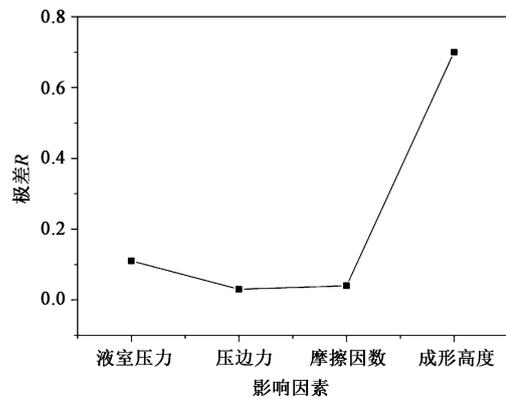


图 5 各因素对最大回弹量的影响程度

Fig. 5 Influence degree of various factors on maximum springback amount

以最优工艺参数组合进行再次求解,得到零件的最大减薄率为 12.47%,最大增厚率为 4.49%,

最大回弹量为 1.75 mm，如图 6 所示。从图 6 可知，回弹量最大位置在板料增厚最大位置附近。提取截面进行分析，如图 7a 所示，可知零件球面中段截面 5 的减薄较严重，主要原因为：该位置的径向拉应力最大，其他位置材料无法及时补充，材料流动困难，容易减薄，但减薄程度在材料性能允许范围内，未发生开裂；增厚最大位置位于法兰边缘，主要原因为：该处材料从平面位置流向凹模圆角，受到较大的

切向压应力，容易产生材料堆积，导致材料增厚，但无起皱。图 7b 为球底筒形件不同截面的回弹量分布图，可以看出，该截面的最大回弹量为 1.56 mm，向下回弹，且回弹位置主要在凹模圆角附近和凸缘连接处。球底筒形件回弹前后的局部放大图如图 8 所示。在凹模圆角和凸缘连接处，材料从凸缘流入，塑性成形不充分，造成材料堆叠，且处于远端，在径向拉应力影响下产生的回弹较大。

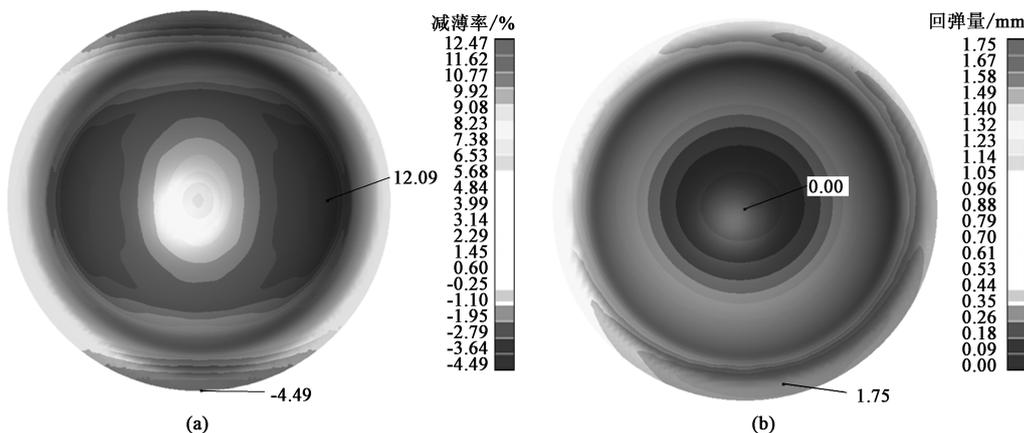


图 6 优化后减薄率 (a) 和回弹量 (b) 分布图

Fig. 6 Distribution diagrams of thinning rate (a) and springback amount (b) after optimization

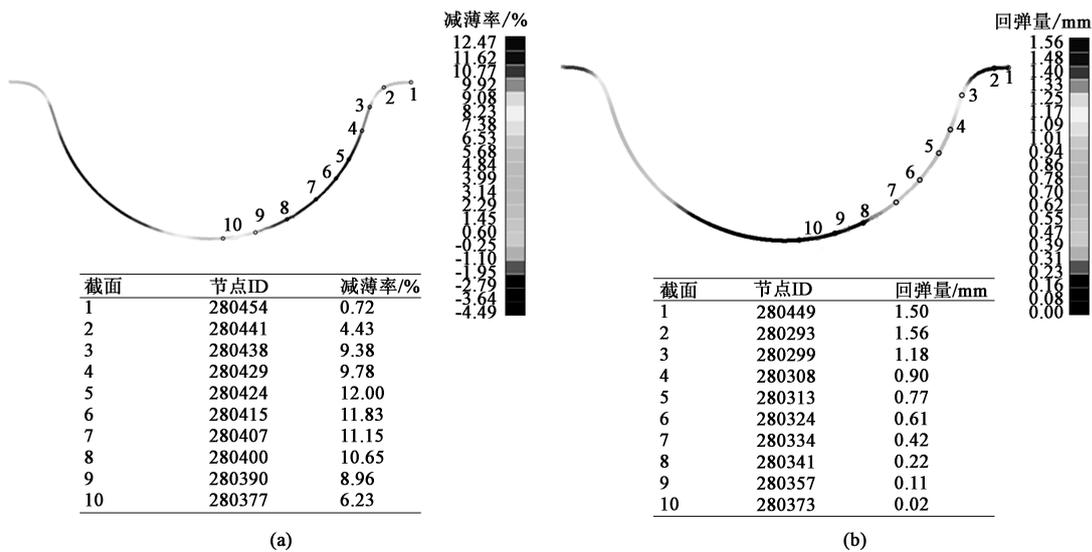


图 7 球底筒形件不同截面的减薄率 (a) 和回弹量 (b) 分布

Fig. 7 Thinning rate (a) and springback amount (b) distributions of different cross-sections for cylindrical part with spherical bottom

采用同样参数对平底筒形件进行模拟仿真，结果如图 9 所示，筒形件成形质量良好，未出现褶皱和开裂缺陷，最大减薄率出现在侧壁位置。以减薄率为指标，对两种筒形件进行比较，球底筒形件的最大减薄率略低于平底筒形件，两种筒形件的最大增厚位置均出现于凸缘边缘，但两者增厚区域差异较大，球底

筒形件的最大增厚率为 4.49%，平底筒形件的最大增厚率为 14.57%，为前者的 3 倍。其原因在于球底筒形件受到径向拉应力和切向拉应力的共同作用，减薄区域更大，变形更加均匀；而平底筒形件由于凸模圆角的作用，侧壁主要受径向拉应力影响，加剧了材料流入的不均匀性，导致凸缘处加厚严重。

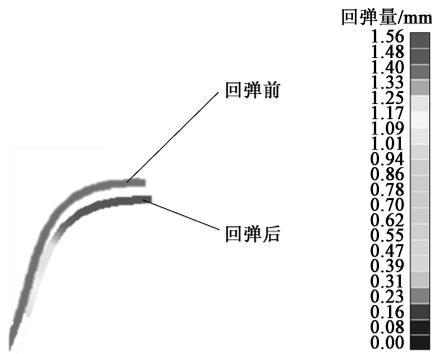


图 8 截面凹模圆角处回弹前后对比

Fig. 8 Comparison before and after springback at die fillet of cross-section

在回弹方面，两种筒形件的最大回弹量相近，球底筒形件为 1.75 mm，平底筒形件为 1.73 mm，

均出现在凸缘处，如图 10 所示。

为了验证模拟仿真结果的可靠性，并测试充液成形下球底筒形件的成形极限，采用优化后的参数成形球底筒形件构件。成形后的构件如图 11 所示，拉深系数 m 可达 0.42，此时构件未发生开裂和起皱。

4 结 论

(1) 相较传统成形方法，充液成形可以实现 7075 铝合金球底筒形件低拉深系数成形，拉深系数可达 0.42，在较大工艺参数范围内成形零部件，无开裂、起皱，质量良好。

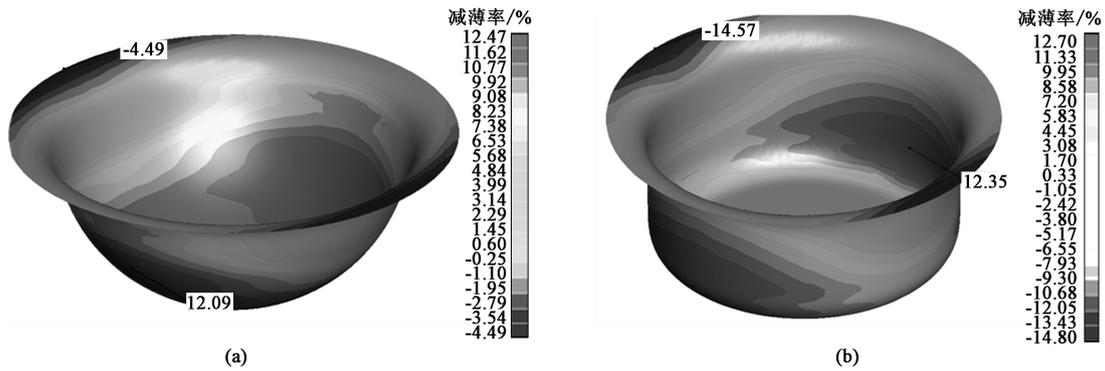


图 9 球底筒形件 (a) 和平底筒形件 (b) 的减薄对比

Fig. 9 Comparison of thinning between cylindrical parts with spherical bottom (a) and flat bottom (b)

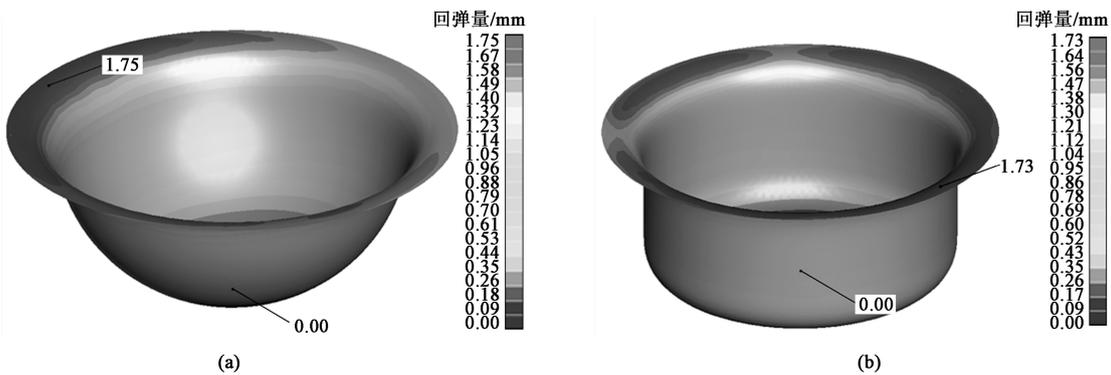


图 10 球底筒形件 (a) 和平底筒形件 (b) 的回弹对比

Fig. 10 Comparison of springback between cylindrical parts with spherical bottom (a) and flat bottom (b)

(2) 通过正交试验分析可得，影响零件减薄率的主要因素为液室压力、压边力和摩擦因数，成形高度是影响球底筒形件回弹性能的主要因素。综合考虑材料减薄和回弹性能，获得优化工艺参数组合：液室压力为 50 MPa，压边力为 200 kN，摩擦因数为 0.05，成形高度为 50 mm，该参数下零件的减薄率低、回弹量小，满足设计要求。

(3) 在相同参数下，球底筒形件和平底筒形件的回弹量相近，但球底筒形件的厚度分布更均匀，有利于材料的充分利用。

参考文献：

[1] 臧其其, 闫华军, 张双杰, 等. 基于 Dynaform 的铝合金汽车地板梁成形分析及工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26



图 11 充液成形球底筒形件构件

Fig. 11 Component of cylindrical part with spherical bottom by hydroforming

(2): 125-131.

Zang Q Q, Yan H J, Zhang S J, et al. Forming analysis and process parameters optimization for automobile aluminum alloy floorbeam based on Dynaform [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (2): 125-131.

- [2] 黄丽容, 张池, 刘文, 等. 大膨胀率薄壁管复合内高压成形工艺研究 [J]. *塑性工程学报*, 2020, 27 (8): 52-59.
Huang L R, Zhang C, Liu W, et al. Composite internal high pressure forming process of thin-walled tube with large expansion ratio [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27 (8): 52-59.
- [3] 顾勇, 袁鸿斌, 吴小涛, 等. 板料液压成形的研究现状 [J]. *机械制造*, 2018, 56 (8): 60-63.
Gu Y, Yuan H B, Wu X T, et al. Research status of sheet metal hydroforming [J]. *Mechanical Engineering*, 2018, 56 (8): 60-63.
- [4] 凡晓波, 王旭刚, 陈险烁, 等. 铝合金管材超低温介质压力胀形行为 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (4): 1-6.
Fan X B, Wang X G, Chen X S, et al. Behavior of ultra-low temperature medium bulging for aluminum alloy tube [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (4): 1-6.
- [5] 李晓冬, 徐雪峰, 华如雨, 等. 5052 铝合金 T 型三通管内高压成形规律研究 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28 (3): 41-49.
Li X D, Xu X F, Hua R Y, et al. Research on internal high pressure forming laws of 5052 aluminum alloy T-shape tube [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (3): 41-49.
- [6] 刘伟, 胡蓝, 郝永刚, 等. 高强铝合金复杂曲面件液压成形变形均匀性调控 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26 (2): 43-49.
Liu W, Hu L, Hao Y G, et al. Deformation uniformity control of complex curved part during hydroforming process with high strength aluminum alloy [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (2): 43-49.
- [7] 张三敏, 郎利辉, 矫志辉, 等. 汽车结构钢大曲率变截面管件充液成形工艺优化 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (4): 96-100.
Zhang S M, Lang L H, Jiao Z H, et al. Optimization on hydroforming process of large-curvature variable-section pipe for automo-

bile structural steel [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (4): 96-100.

- [8] Liu W, Chen Y Z, Yuan S J. Mechanism analysis on thickness distribution of aluminum alloy hemispherical shells in double-sided sheet hydroforming [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89 (5-8): 2011-2020.
- [9] 冯瑶, 蔡玉俊, 郭志远, 等. 5182 铝合金引擎盖内板充液成形实验工艺参数优化 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (11): 107-112.
Feng Y, Cai Y J, Guo Z Y, et al. Optimization on experimental process parameters in hydroforming of hood inner panel for 5182 aluminum alloy [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (11): 107-112.
- [10] 杨声伟, 于弘喆, 张淳, 等. 充液成形技术在航天火箭整流罩成形中的应用 [J]. *航空制造技术*, 2020, 63 (1): 107-112.
Yang S W, Yu H Z, Zhang C, et al. Application of hydroforming technology in aerospace rocket fairing forming [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63 (1): 107-112.
- [11] 毕海娟, 田恕, 李继光, 等. 椭圆瓜瓣构件充液成形模具设计及优化 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (6): 167-173.
Bi H J, Tian S, Li J G, et al. Design and optimization on hydroforming die for ellipsoidal melon petal component [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (6): 167-173.
- [12] 李晓光, 矫志辉, 赵文华, 等. 外凸型变曲率内锥体深腔曲面高温合金构件充液成形工艺优化 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (8): 117-122.
Li X G, Jiao Z H, Zhao W H, et al. Optimization on superalloy component hydroforming process for deep-cavity curved surface of convex-shaped inner cone with variable curvature [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (8): 117-122.
- [13] 曾一畔, 徐勇, 夏亮亮, 等. 加载路径对铝合金航空复杂薄壁构件主动式充液成形性能的影响 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26 (5): 180-189.
Zeng Y P, Xu Y, Xia L L, et al. Influence of loading paths on formability of aviation complex thin-walled component of aluminum alloy in hydroforming [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (5): 180-189.
- [14] 周国伟, 李大永, 彭颖红. 7075-T6 高强度铝合金温热条件下的拉深成形性能 [J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46 (9): 1482-1486.
Zhou G W, Li D Y, Peng Y H. Deep drawability of 7075-T6 high strength aluminum alloy at warm condition [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46 (9): 1482-1486.
- [15] 李奎, 邱超斌, 郭全庆, 等. 大法兰平底筒形件充液成形壁厚规律研究 [A]. 中国航空学会. 2019 年 (第四届) 中国航空科学技术大会 [C]. 北京, 2019.
Li K, Qiu C B, Guo Q Q, et al. Investigation on hydroforming of wall thickness distribution rule of flat bottom cylindrical part [A]. *Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. 2019 (4th) China Aeronautical Science and Technology Conference [C]. Beijing, 2019.*