

双曲率薄壁铝合金盒形件充液成形工艺

于弘喆^{1,2}, 姜秀玉³, 樊彬彬³, 吴华东³, 王林³, 郎利辉⁴, 米新征¹

(1. 天津市天锻压力机有限公司, 天津 300142; 2. 天津天锻航空科技有限公司, 天津 300142;
3. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110850; 4. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 双曲率薄壁铝合金盒形件是一种常见的飞机内蒙皮类钣金零件。针对目标零件采用传统落压成形过程中存在的生产效率低、表面质量差的问题, 采用充液成形工艺成形该类零件, 其目的在于提高零件表面质量并降低模具成本。通过数值模拟软件, 建立了双曲率薄壁铝合金盒形件主动式充液成形的有限元模型, 通过分析液室压力、压边力加载路径、润滑条件等因素对零件成形性的影响, 对零件成形的起皱和破裂情况进行分析, 优化确定最佳的工艺参数。并依据优化后的工艺参数进行了现场实验, 利用数值模拟技术分析和解决了现场实验零件的质量问题, 成功制造出合格零件, 进一步验证了工艺方案及工艺参数的可行性。

关键词: 充液成形; 双曲率薄壁铝合金盒形件; 液室压力; 压边力加载路径; 润滑条件; 起皱; 破裂

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.012

中图分类号: TG394 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 02-0094-08

Hydroforming process on double curvature thin-walled aluminum alloy box part

Yu Hongzhe^{1,2}, Jiang Xiuyu³, Fan Binbin³, Wu Huadong³, Wang Lin³, Lang Lihui⁴, Mi Xinzheng¹

(1. Tianjin Tianduan Press Co., Ltd., Tianjin 300142, China;
2. Tianjin Tianduan Aviation Technology Co., Ltd., Tianjin 300142, China;
3. Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China;
4. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Double curvature thin-walled aluminum alloy box part is a common aircraft skin sheet metal part. Aiming at the problems of low production efficiency and poor surface quality in the traditional blanking process of the target parts, the hydroforming process is used to form the parts to improve the surface quality of the parts and reduce the die cost. Therefore, the finite element model of hydroforming for double curvature thin-walled aluminum alloy box parts was established by the numerical simulation software, and through analyzing the influences of liquid chamber pressure, blank holder force loading path, lubrication conditions and other factors on the formability of the parts, the wrinkling and cracking situations of the parts forming were analyzed, and the optimum process parameters were optimized. Then, the field experiment was carried out according to the optimized process parameters, and the quality problems of the field experiment parts were analyzed and solved by numerical simulation technology. Finally, the qualified parts were successfully manufactured, and the feasibility of the process scheme and the process parameters was further verified.

Key words: hydroforming; double curvature thin-walled aluminum alloy box parts; liquid chamber pressure; blank holder force loading path; lubrication conditions; wrinkling; cracking

近年来, 随着各类飞行器性能要求的逐步提升, 对钣金零部件的设计要求也在不断提高。由于航空器铝合金钣金零件具有单件产量低、品种繁多、曲面复杂的特点, 各大主机厂常采用传统落压工艺生产铝合金钣金件。但此类传统落压成形结合手工敲

修的工艺, 人工干预较多, 生产质量难以稳定, 且敲修零件的晶粒度、残余应力分布不均匀, 造成零件存在表面质量差、抗疲劳性能差、废品率高等诸多缺陷, 不能满足新一代航空器的设计需求^[1-3]。

板材充液成形技术是一种采用流体传力介质替代传统模具的新型板材成形技术。该工艺具有成形极限高、表面质量高、成形精度高、模具成本低等多项优势, 适用于航空航天领域的小批量钣金零件的精密成形。该技术常分为两类, 采用流体传力介质替代传统凸模的主动式充液胀形^[4]和采用流体传

收稿日期: 2022-03-28; 修订日期: 2022-06-26

作者简介: 于弘喆 (1993-), 男, 学士, 工程师

E-mail: sorayhz@163.com

通信作者: 米新征 (1985-), 男, 学士, 工程师

E-mail: tdhklwq@163.com

力介质替代传统凹模的被动式充液拉深^[5]。

1 零件简介

双曲率薄壁铝合金盒形件是一种航空航天领域常见的钣金零件类型。如图1所示，双曲率薄壁盒形件圆角以上均为曲面，无直壁面，若采用传统的冲压拉深工艺成形，需要进行多道次拉深，且需要退火热处理辅助成形，生产效率低^[6]。



图1 零件的三维数模

Fig. 1 Three-dimensional digital model of part

1.1 零件材质

零件材质为6A02铝合金，考虑到零件在工作状态的力学性能要求，该铝合金零件交付前需固溶并人工时效至T62态，因此，需充分考虑铝合金固溶对零件成形产生的影响。基于拉伸实验，分别测量出6A02铝合金在O态以及固溶后不同时间段内的材料力学性能，如表1所示。测量方法依据国家标准进行，其中，力学性能的测定基于GB/T 228.1—2021^[7]，材料塑性应变比 R 值的测定基于GB/T 5027—2016^[8]。

表1 6A02铝合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 6A02 aluminum alloy

热处理状态	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率/ %	各向异性 系数 r	硬化 指数 n
O态	45.6	115.3	37.1	0.47	0.283
固溶后0.5 h	92.5	216.6	22.9	0.45	0.310
固溶后1.0 h	105.0	230.1	19.3	0.44	0.330

1.2 零件成形难点

(1) 零件侧壁曲率较缓，采用传统的单工序拉深成形工艺时，零件侧壁上的板料绝大部分处于悬空状态，且在拉深过程中受切向压应力影响，零件侧壁容易产生起皱现象，如图2所示。然而，单纯通过增大压边力来增大零件侧壁的径向拉应力从而克服起皱现象又极易造成零件破裂。因此，该零件



图2 起皱的零件

Fig. 2 Wrinkled part

采用传统的冲压成形方案时不宜采用单工序拉深成形，需要进行多道次拉深，且在成形过程中需退火处理。但多套模具的生产成本高且单件生产效率低。

(2) 由于零件交付前需要进行固溶热处理，而零件在固溶时容易发生固溶变形，这将导致零件精度超差，因此，零件只能在成形前或者成形中固溶。

考虑铝合金零件极易因成形中固溶发生“桔皮”现象，针对该现象，利用液压胀形实验^[9]对材料进行定性实验。将2块6A02铝合金板料分别进行成形前固溶和成形中固溶，最终均胀形至减薄率最大值为20%，观察其表面质量状态如图3所示。

由图3b可知，6A02铝合金材料在成形中取出固溶后再成形，将发生严重的“桔皮”现象。而图3a中材料在固溶后成形无“桔皮”现象，故零件只可在成形前固溶，以避免成形后的零件表面发生“桔皮”现象。通过分析表1数据，对比材料固溶前后的断后伸长率可知，6A02铝合金材料固溶后塑性有所下降，且随着时间的增长，材料不断地发生自然时效硬化，造成材料塑性逐步降低。该铝合金材料的特性对零件生产成形工艺提出了更高的要求^[10]。

2 有限元仿真分析

2.1 仿真数值模型的建立

本文研究双曲率薄壁铝合金盒形件在主动式充液成形过程中各项工艺参数对零件成形性的影响，建立的仿真模型如图4所示。

仿真模型分别由密封上盖板、外型面凹模、板料3部分构成。由于采用主动式充液胀形工艺成形该零件，因此，密封上盖板中间为空腔，其内部充入高压流体传力介质替代凸模以迫使板料贴覆外型面凹模。在板料的壳节点上施加法向压强替代流体传力介质对板料产生的压强进行分析。

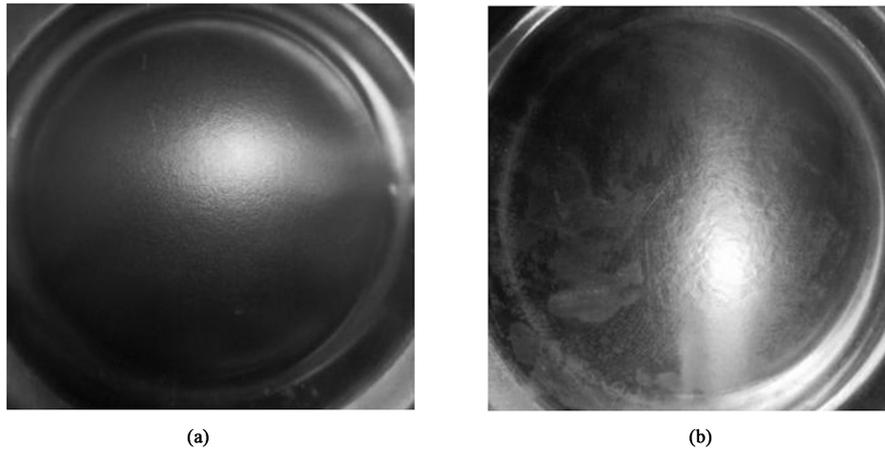


图 3 成形中不同阶段固溶的零件表面

(a) 成形前固溶 (b) 成形中固溶

Fig. 3 Surfaces of parts to solid solution in different stages during forming

(a) Solid solution before forming (b) Solid solution in forming process

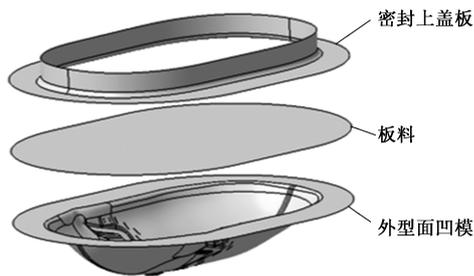


图 4 零件仿真模型

Fig. 4 Simulation model of part

2.2 仿真过程及参数影响

根据零件工艺特点,零件成形及仿真过程主要分为两个阶段。(1)第1阶段,低压预成形。向密封上盖板和板料间形成的封闭液室内注入流体传力介质。模具内液体增压时,给予密封上盖板较低的压力,使得平面法兰上的板料能够向内发生流动进行低压补料。(2)第2阶段,高压整形。待整个零件大面特征均基本张贴时,模具内继续增压至较高的压强来整形零件内的局部特征。

初始零件工艺参数如表 2 所示。

表 2 充液成形工艺的初始参数

Table 2 Initial parameters of hydroforming process

成形阶段	液室压力/MPa	压边力/kN
低压预成形	0~5	1000~3000
高压整形	70	6000

2.3 压边力加载路径对零件成形性的影响

低压预成形阶段,零件随着内部液压的增加逐

步贴覆凹模,在成形过程中调节压边力可有效地调整成形过程中的材料流动。如表 3 所示,在仿真中给予密封上盖板不同的压边力加载路径,分析不同的压边力加载路径对零件成形性的影响。

表 3 3种压边力的加载路径

Table 3 Loading paths of three kinds of blank holder forces

液室压力/MPa	压边力/kN		
	加载路径 a	加载路径 b	加载路径 c
0	1000	1000	1000
1	2000	2000	1500
2	3000	3000	2000
3	3000	3000	3000
4	3000	6000	3000
5	3000	6000	3000

图 5a、图 5b 和图 5c 分别为压边力加载路径 a、b 和 c 对应的壁厚减薄率分布云图。通过对比图 5 中不同压边力加载路径下的减薄率分布云图趋势可知,不同的压边力加载路径,其减薄率分布趋势均为从盒底至法兰依次减少的趋势。这是因为零件成形过程中,坯料在液压作用下逐步贴覆凹模,板料从凹模侧壁向盒底逐步贴覆,贴覆模具的部分受液压影响发生“摩擦保持”现象^[11],即由于液体压力作用导致板料和模具间的摩擦力增大,从而难以流动。因此,越晚贴覆模具的部分板料,其材料越难以得到补充,导致无论何种压边力加载路径下,零件的减薄率分布规律均为盒底至法兰依次减少的趋势。

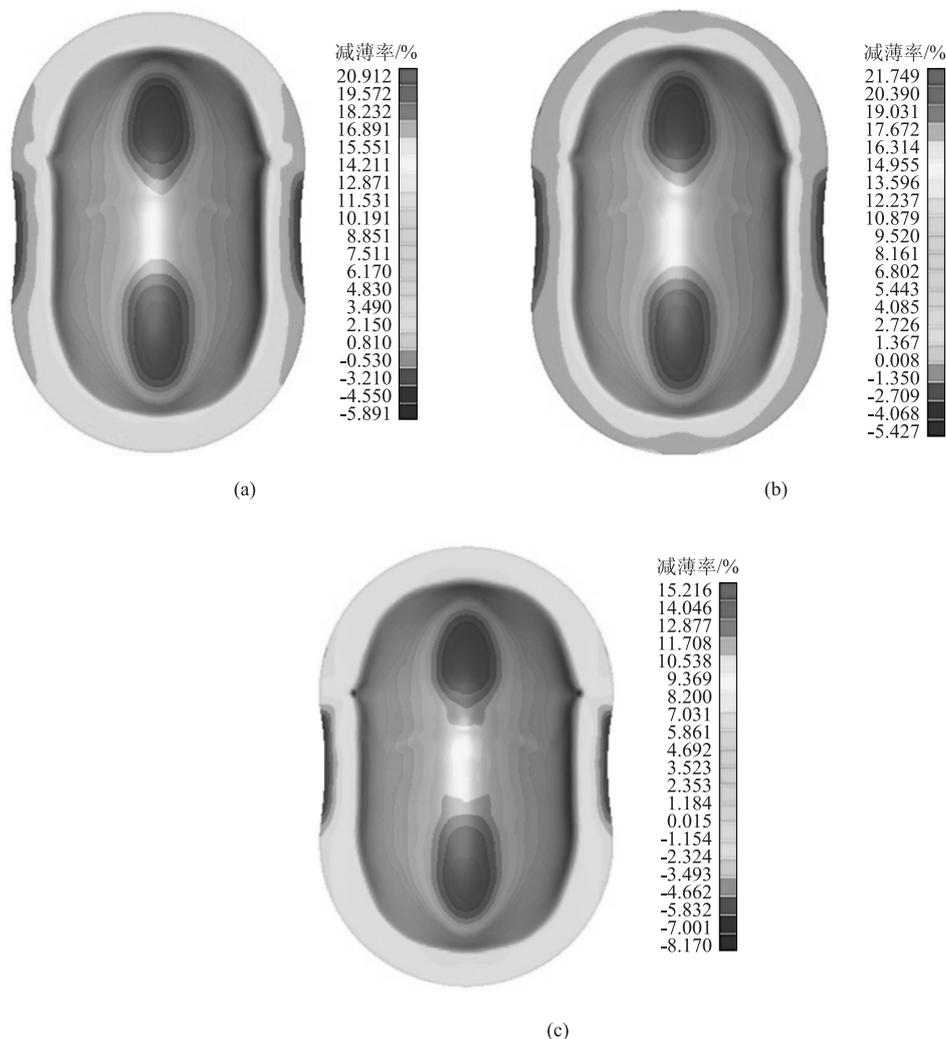


图 5 不同压边力加载路径下的壁厚减薄率分布云图

(a) 加载路径 a (b) 加载路径 b (c) 加载路径 c

Fig. 5 Cloud maps of wall thickness thinning rate distribution under different blank holder force loading paths

(a) Loading path a (b) Loading path b (c) Loading path c

通过对比图 5a 和图 5c 可以发现, 采用压边力加载路径 c 的仿真结果更加优秀, 整体零件的最大壁厚减薄率相对降低, 避免了零件在底部发生破裂、“桔皮”等不良现象。压边力加载路径 c 的前期压边力较小, 有助于法兰材料向型腔内流动, 避免零件因变薄过大而发生破裂现象。

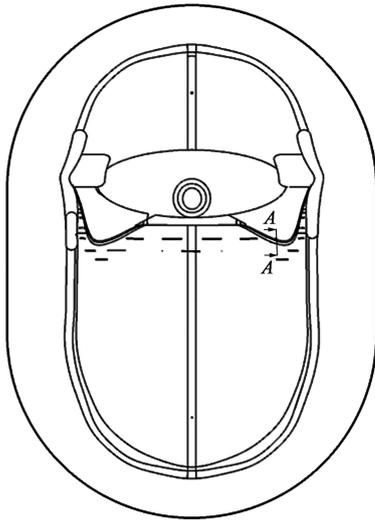
通过对比图 5a 和图 5b 可知, 当液室压力达到 3 MPa 后, 压边力调整对零件的壁厚减薄率变化影响可以忽略不计, 这是因为板料在液室压力达到 3 MPa 后型面已贴覆大部分区域, 仅剩部分局部区域未张贴, 由于液压的“摩擦保持”现象, 此时再对压边力进行调节, 也无法使得材料继续向型面内流动。因此, 采用主动式充液成形工艺制作双曲率薄壁铝合金盒形件, 随着液压的增大和型面的逐步

贴覆, 压边力的调节作用逐步降低。

2.4 高压整形阶段液室压力和润滑条件对局部圆角特征的影响

如图 6 所示, A-A 剖面图中标识的凹圆角即为零件的局部圆角特征。由于液室内部压力处处均等的特性, 使得零件局部圆角特征区域的液室压力不能局部增强, 需要通过整体增大液压的方式来迫使零件局部圆角特征成形, 且在成形过程中局部圆角特征周边的材料流动受液压和摩擦因数的双重影响, 导致局部圆角特征成形和液室压力及润滑条件有关^[12]。

采用 MMW-1 型立式万能摩擦磨损试验机测量铝合金和模具在不同润滑条件下的摩擦因数, 具体如下表 4 所示。



局部圆角特征 A-A

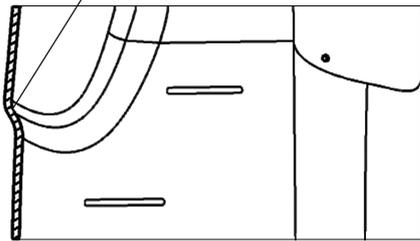


图 6 零件局部圆角特征位置说明

Fig. 6 Location description of part local fillet feature

表 4 不同润滑条件下的摩擦因数

Table 4 Friction coefficients under different lubrication conditions

润滑条件	摩擦因数
干摩擦	0.21
涂油润滑	0.09
贴膜润滑	0.06

在仿真中根据润滑情况给予不同的摩擦因数，并逐步增大液压至 100 MPa，测量和记录在零件局部圆角特征处圆角半径尺寸的变化，并绘制为图 7，记录零件局部圆角特征处圆角半径尺寸和液室压力之间的实时变化关系。

由图 7 中的干摩擦曲线可知，在不润滑的情况下，随着零件液室压力的增大，零件局部圆角特征处的圆角半径尺寸逐步变小直至完全贴覆凹模，且在 70 MPa 时完全贴覆凹模，局部圆角特征整形完毕。通过该曲线可以发现，随着局部圆角特征处圆角半径尺寸的减小，所需的液压翻倍增长，这是由

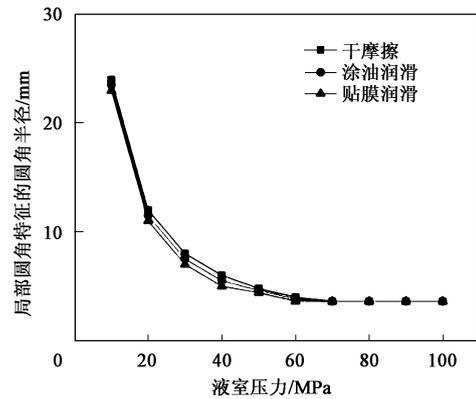


图 7 不同摩擦条件下零件局部圆角特征的圆角半径和液室压力的关系

Fig. 7 Relationship between fillet radius of part local fillet feature and liquid chamber pressure under different friction conditions

于局部圆角特征两侧的板料和模具间发生了“摩擦保持”现象，局部圆角特征处的板料无法得到补充，仅能依靠自身变薄来贴覆模具，因此，需要较大的压强才能使其贴模。而传统刚性模则会因局部不贴覆而使得压力集中在局部圆角特征处，因此，相对于传统模具冲压，主动式充液成形反而不利于零件局部圆角特征成形。

通过观察图 7 中不同摩擦因数下的最大液室压力可知，随着润滑条件的逐步改善，零件整形所需的最大液室压力逐步降低，但效果并不非常明显。润滑条件的改善可有效减少“摩擦保持”现象，使得局部圆角特征处的板料能够从边缘得到补充，但由于发生摩擦保持的板料整体面积过大，其材料流动效果有限。经过仿真确认，在板料表面贴覆特氟龙薄膜可以将零件局部圆角特征成形所需最大液室压力降低至 60 MPa。

3 现场实验及问题分析

3.1 初次实验结果

根据仿真分析结果，开展零件试制工作。零件试制在天津天锻航空科技有限公司的 1000 t 充液成形液压机上进行。通过模具制造和现场调试生产，成功制造出零件。但零件试制中实际生产的零件部分发生单侧起皱现象，如图 8 所示。

3.2 利用仿真分析工艺问题

经现场测量发现，起皱零件的法兰处两侧材料流动不均匀。

(1) 板料偏心量对成形的影响



图 8 初次试制出的零件

Fig. 8 Parts produced for the first time

在检测型面粗糙度后，排除型面抛光原因后，猜测是由于板料摆放偏心以及形状精度不足而造成的材料流动不均。因此，为估算材料流动不均的具体数值，比对板料成形前后的法兰边缘位置距离，即计算出板料的边缘流动量，用板料的边缘流动量来表示法兰处的板料向液室内流动的具体数量。

因此，在仿真中将板料向两侧直边的某一侧放偏，测量在不同的偏心量的情况下，板料两侧直边处的边缘流动量数值，测量结果如图 9 所示。

由图 9c 发现，零件发生单侧起皱现象，为分析板料位置偏心量对板料边缘流动量的影响，采用在法兰两侧直边处的板料边缘流动量最大差值和板料位置偏心量构成图 10。

如图 10 所示，当板料位置偏心量超过一定阈值时，会造成两侧材料流动的较大差异。偏心量达到 1.0 mm 后，零件法兰直边处的材料流动量差值高达 9.26 mm，且流料较多的一侧发生起皱现象。

(2) 润滑方式对成形的影响

在仿真中，参照表 3，针对不同偏心量的板料采用不同的摩擦因数进行分析，分析在不同的板料位置偏心量的情况下，不同的润滑方式对材料流动的影响^[11]。如图 11 所示，摩擦因数的减少会加剧偏心量较高的板料的材料流动不均现象。其次，偏心量越高，摩擦因数对材料流动不均的影响越大。

(3) 板料位置偏心的机理分析

板料偏心对零件成形性的影响主要体现在两侧法兰的材料流动量上，如图 10 所示，多料区域与少料区域的材料流动差异会随着偏心量的增加而直线上升。

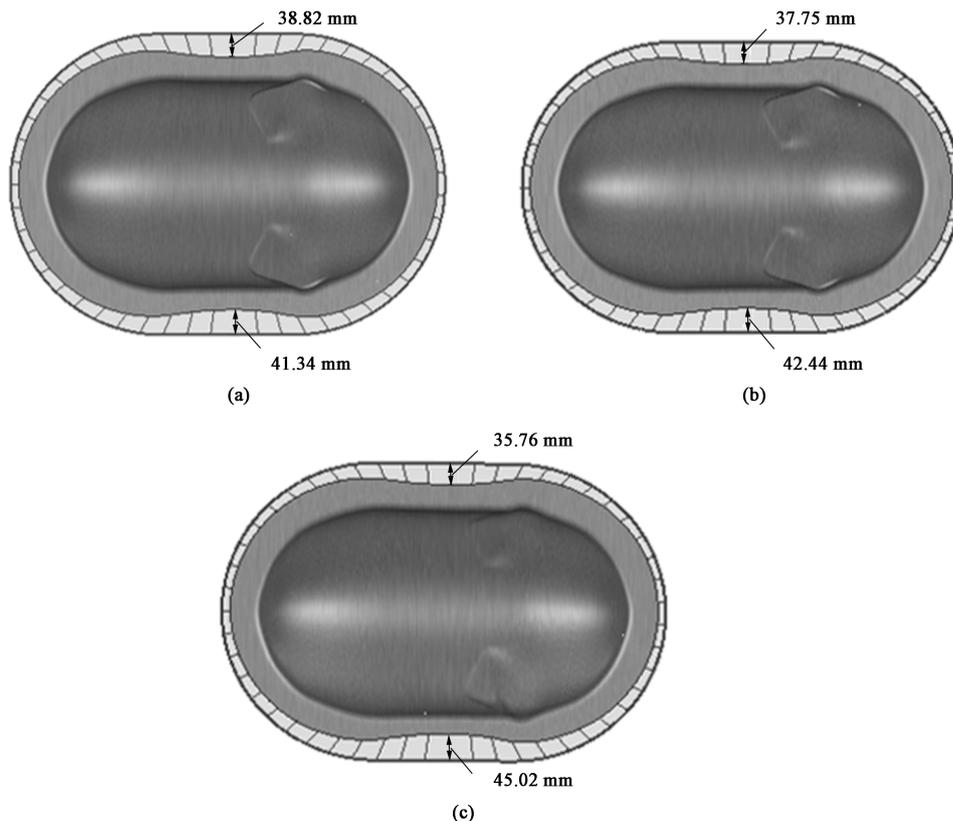


图 9 不同板料位置偏心量下的板料边缘流动量

(a) 偏心量为 0.2 mm (b) 偏心量为 0.5 mm (c) 偏心量为 1.0 mm

Fig. 9 Sheet edge flow amounts under different sheet position eccentricity amounts

(a) Eccentricity amount of 0.2 mm (b) Eccentricity amount of 0.5 mm (c) Eccentricity amount of 1.0 mm

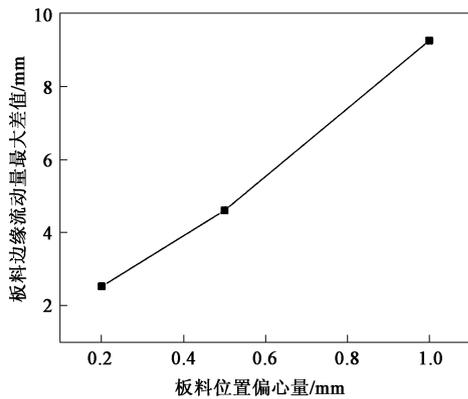


图 10 板料位置偏心量和板料边缘流动量最大差值的关系
Fig. 10 Relationship between eccentricity amount of sheet position and maximum difference of sheet edge flow amount

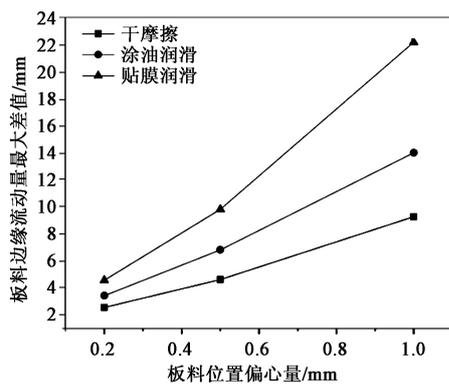


图 11 润滑方式对板料位置偏心量造成的板料边缘流动量最大差值的影响
Fig. 11 Influence of lubrication mode on maximum difference of sheet edge flow amount caused by sheet position eccentricity

两侧材料流动量的差异是因为两侧材料的阻力不同，而两侧材料的阻力主要来源于两侧法兰的摩擦力^[13]，摩擦力则受压边力、摩擦因数、接触面积的影响。因此，润滑方式的修改也会导致摩擦力发生变化，会加剧板料位置偏心造成的材料流动不均现象。

板料位置偏心本质上是对两侧板料的接触面积产生了影响。由于是板料位置偏心造成的面积差异，单侧面积的减少会造成另一侧面积的增加，此消彼长之下，其接触面积的差异会被放大，使得板料位置的轻微偏心就会造成较大的影响。

但在刚性拉深中，板料位置偏心未发生较大影响。这点可以通过如图 12 所示的充液胀形过程和如图 13 所示的传统冲压过程的不同来寻找原因。在传统冲压过程中，板料和凸模发生摩擦，凸模和板料的摩擦力使得板料在成形过程中不会轻易发生攒动。而在充液胀形过程中，板料下方为空气，上方为液

体水，上下表面的摩擦力几乎没有，板料两侧法兰区域直接进行较力。故相比于传统冲压，采用液体替代凸模，更容易在成形过程中由于两侧法兰拉力不均发生单侧流料的现象。因此，采用充液胀形工艺成形双曲率薄壁铝合金盒形件对材料的尺寸精度及位置精度的误差要求更高。



图 12 零件充液胀形过程
Fig. 12 Hydrobulging process of part



图 13 零件拉深成形过程
Fig. 13 Drawing process of part

(4) 板料位置偏心的解决方法

针对板料位置偏心问题，下料方式由剪板机下料改用激光切割下料以提高板料边缘尺寸精度，并采用定位销定位提高板料位置精度，将板料位置偏心量的累积误差降低至 0.5 mm 以内，确保零件不发生起皱现象。

3.3 最终实验结果

经过改进工艺，现场试模情况良好，最终成形零件见图 14。

4 结论

(1) 利用数值模拟技术对双曲率薄壁铝合金盒形件进行了工艺分析，分析过程中通过单因素法分析了不同工艺参数对零件成形的影响。确定了在低压预成形阶段，零件在压边力加载路径 c 的条件下最大减薄率低至 15.2%，该方案成形效果最佳。

(2) 在高压整形阶段，分析了不同润滑效果的摩擦因数对零件整形局部圆角特征所需的液室压力的影响，润滑越充分，整形所需的液室压力越小，零件试制所需的设备吨位越低，越有利于降低零件生产成本。

(3) 采用主动式充液成形工艺成形双曲率薄壁铝合金盒形件，需严格控制板料的位置精度和尺寸精度，板料位置偏心量累积误差需控制在 0.5 mm

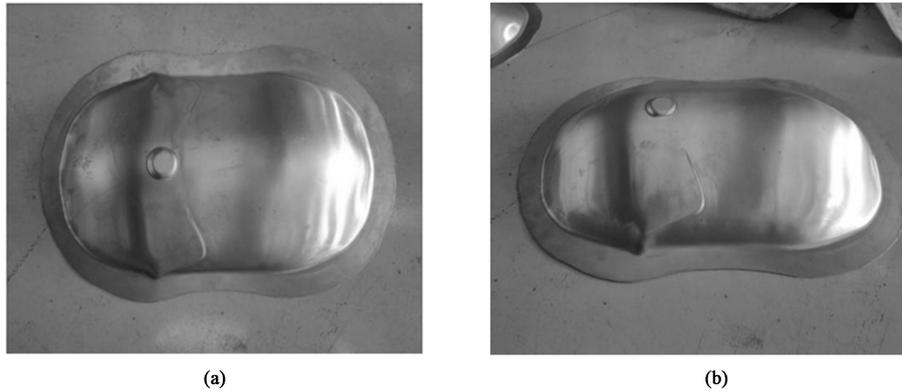


图14 生产出的零件成品

(a) 正视图 (b) 侧视图

Fig. 14 Finished part of production

(a) Front view (b) Side view

以内，否则极易因流料不均发生单侧起皱现象，造成工艺不稳定。

参考文献：

- [1] 苑世剑, 王仲仁. 内高压成形的应用进展 [J]. 中国机械工程, 2002, 13 (9): 783-767.
Yuan S J, Wang Z R. Application development in internal high pressure forming process [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13 (9): 783-767.
- [2] Amino H, Nakamura K, Nakagawa T. Counter-press deep drawing and its application in the forming of automobile parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1990, 23: 243-265.
- [3] 张士宏, 程明, 宋鸿武, 等. 航空航天复杂曲面构件精密成形技术的研究进展 [J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52 (1): 1-11.
Zhang S H, Cheng M, Song H W, et al. Research progress on precision forming technology for complex curved surface components in aerospace [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52 (1): 1-11.
- [4] 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.
- [5] 陈一哲. 2219 铝合金筒形件充液拉深成形研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Chen Y Z. Research on Hydromechanical Deep Drawing of 2219 Aluminium Cylindrical Cup [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2013.
- [6] 李园魁. AZ31 镁合金双曲率盒形件温热成形研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
Li Y K. Research on Warm Forming of AZ31 Magnesium Alloy Double Curvature Square Cup [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [7] 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].
- [8] GB/T 5027—2016, 金属材料 金属薄板和薄带塑性应变比 (r 值) 的测定 [S].
GB/T 5027—2016, Metallic materials—Sheet and strip—Determination of plastic strain ratio [S].
- [9] 王志恒, 刘文敏. 板材液压胀形实验研究 [J]. 内蒙古工学院报, 1985, (1): 77-88.
Wang Z H, Liu W M. An experimental analysis of hydraulic bulging test of sheet metals [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology, 1985, (1): 77-88.
- [10] 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.
- [11] 苏海迪, 彭永东, 许元洪, 等. 摩擦保持对充液拉深成形作用的仿真分析 [J]. 装备制造技术, 2017, (12): 146-147.
Su H D, Peng Y D, Xu Y H, et al. Simulation analysis on the effect of friction stay on hydromechanical deep drawing [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017, (12): 146-147.
- [12] 周浩. 汽车覆盖件拉延成形力影响因素分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
Zhou H. Analysis of Sheetmetal Forming Force Influential Factors for Auto-panel Drawing Process [D]. Changsha: Hunan university, 2011.
- [13] 李奎, 刘波, 邱超斌, 等. 环形蒙皮零件的被动式充液成形技术 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (3): 103-108.
Li K, Liu B, Qiu C B, et al. Passive hydroforming technology for ring-shaped skin parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 103-108.