

2A16 铝合金簸箕形薄壁件成形工艺

车 利, 郭全庆, 刘 波, 李小曼, 董东岳

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要: 确定了一种 2A16 铝合金簸箕形薄壁件的成形工艺方案, 并采用 DYNAFORM 软件进行有限元模拟, 研究成形过程中的裂纹和起皱等影响产品质量的问题。通过模拟分析得到了铝合金簸箕形薄壁件在不同凸凹模间隙和压边力下的凸凹模间隙-最大减薄率和增厚率曲线、压边力-最大减薄率曲线、压边力-最大增厚率曲线, 对比了不同毛坯尺寸时的工件成形质量, 确定了最佳工艺参数为: 毛坯尺寸为 237.42 mm×319.24 mm、凸凹模间隙为 1.75 mm、压边力为 50 kN。将成对拉深与单件拉深进行对比, 发现材料利用率提升了 48.498%, 产品加工效率提高了 1 倍。最终通过拉深成形实验, 验证了成对拉深成形方案和各工艺参数的合理性, 为簸箕形薄壁件的成形提供了技术参考。

关键词: 2A16 铝合金; 薄壁件; 成对拉深; 毛坯尺寸; 凸凹模间隙; 压边力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.013

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0087-07

Forming process on dustpan-shaped thin-wall part for 2A16 aluminum alloy

Che Li, Guo Quanqing, Liu Bo, Li Xiaoman, Dong Dongyue

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

Abstract: A forming process scheme of dustpan-shaped thin-walled part for 2A16 aluminum alloy was determined, and software DYNAFORM was used for finite element simulation to study the problems affecting the product quality such as cracks and wrinkles during the forming process. Then, for aluminum alloy dustpan-shaped thin-walled part, the punch-die clearance-maximum thinning rate and thickening rate curves blank holder force-maximum thinning rate curve, and blank holder force-maximum thickening rate curve were obtained by simulation analysis at different punch-die clearances and blank holder forces, and by comparing the forming quality of workpiece with different blank sizes, the optimal process parameters were determined as the blank size of 237.42 mm×319.24 mm, the punch-die clearance of 1.75 mm and the blank holder force of 50 kN. Furthermore, compared with single piece deep drawing, the material utilization rate was increased by 48.498%, and the product processing efficiency was doubled by paired deep drawing. Finally, through the deep drawing experiment, the rationality of the paired deep drawing scheme and the process parameters were verified, which provided technical reference for the forming of dustpan-shaped thin-wall parts.

Key words: 2A16 aluminum alloy; thin-wall part; paired deep drawing; blank size; punch-die clearance; blank holder force

随着现代飞机设计理念中对机体结构轻量化关注度的逐年提升, 使用轻质材料实现结构的轻量化已成为航空、航天、兵器、汽车制造等领域工业发展的趋势^[1-2]。常用的变形铝合金有 2A16、2B16、2A17、2219、2419、2519 等, 具有密度低、强度高、切削性能好的优点, 是各国重点开发的结构材料, 其主要用于 250~300 °C 温度范围内工作的航空航天器^[3-7]。

随着世界航空航天事业的发展, Al-Cu-Mn 系铝合金得以不断研制和开发。20 世纪初期, 飞行一号飞机的发明者莱特兄弟在制造发动机曲柄箱体时采用了 Al-Cu-Mn 铸造铝合金^[8]; 20 世纪初期法国人也成功研制出 A-U5GT 高强韧铸造铝合金; 20 世纪德国人开发出的 AlCu4TiMn 高强度铸造铝合金的性能达到了锻铝水平^[9-10]; 我国在 20 世纪中期成功研制出 2A16、2B16 和 2A17 铝合金^[11]。

本文以 2A16 簸箕形薄壁件为研究对象, 利用有限元模拟软件 DYNAFORM 分析各参数对拉深成形的影响规律, 确定了成形方案, 并通过进一步优化各项工艺参数获得合格产品。

收稿日期: 2022-01-18; 修订日期: 2022-04-20

作者简介: 车 利 (1990-), 男, 学士, 工程师

E-mail: 1025945001@qq.com

1 成形方案的确定

1.1 结构与材料分析

为提高数值模拟的准确性，首先分析材料的化

学成分和力学性能。2A16 铝合金材料的化学成分和力学性能分析可以为后期的有限元模拟提供毛坯材料的各项参数，其化学成分如表 1 所示^[12]，材料力学性能参数如表 2 所示^[12]。

表 1 2A16 铝合金化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of 2A16 aluminum alloy（%，mass fraction）

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	其他	Al
0.30	0.30	6.00~7.00	0.4~0.8	0.05	0.1	0.1~0.20	0.2	0.05	余量

表 2 2A16 铝合金材料力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of 2A16 aluminum alloy

参数	屈服强度 R_{eL} / MPa	抗拉强度 R_m / MPa	弹性模量 E / MPa	硬化指数 n	硬化系数 K / MPa	各向异性系数 r		
						0°	45°	90°
数值	59.2	159.7	34400	0.22	653	0.59	0.62	0.88

由表 2 可知，2A16 铝合金板料在成形时，其 0°、45°和 90°时的 r 值均小于 1，材料在厚度方向容易变形减薄、破裂，因此，必须优化成形方法和工艺参数以降低材料的减薄率，防止板料破裂。

随着轻量化发展，轻质铝合金逐渐在飞机和汽车设计中大量运用。常温板料拉深成形具有工艺简单、生产效率高、板料表面质量高等优势，而板材在常温下的拉深极限低，拉深成形过程中板材易出现起皱、破裂缺陷，极大地制约了其在实际生产中的使用。因此，开展板料拉深成形的研究，优化各工艺参数，获得提升铝合金板料冷拉深成形极限的工艺方案，对提升加工效率、降低生产成本、推进轻质铝合金在工业中的广泛应用具有指导意义^[13]。

簸箕形薄壁件的外形结构如图 1 所示，材料为 2A16 铝合金，厚度为 1.5 mm。传统成形方法采用手工成形，但存在效率低、零件表面质量差、成形质量不稳定、人工成本高等缺点。由上文可知，拉深成形具有工艺简单、生产效率高、板料表面质量

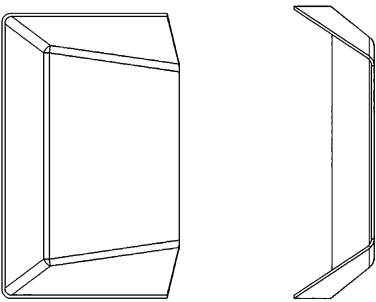


图 1 簸箕形薄壁件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dustpan-shaped thin-walled part

高等优势，因此，本文重点研究拉深成形。

1.2 成形方案的确定

1.2.1 单件拉深成形有限元模拟模型的建立

本文利用 CATIA 三维设计软件分别构建出单件拉深成形需要的凸模、压边圈、毛坯和凹模的三维有限元模拟模型并依次另存为 IGS 格式，将其导入到板料数值模拟软件 DYNAFORM 中。根据拉深成形模具的相对位置建立的有限元模拟模型如图 2 所示。

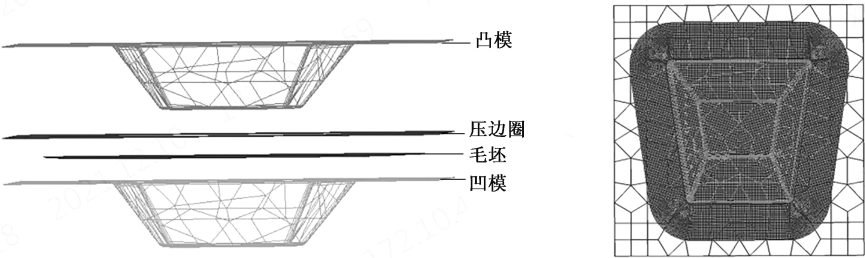


图 2 簸箕形薄壁件单件拉深成形三维有限元模拟模型

Fig. 2 3D finite element simulation model of single piece deep drawing for dustpan-shaped thin-walled part

单件拉深成形有限元模拟的毛坯为 330.45 mm×331.38 mm 的梯形，设置的凸凹模间隙为 1.60 mm，压边圈与凹模的间隙为 1.65 mm，压边力为 20 kN，单件拉深成形结果如图 3 所示。

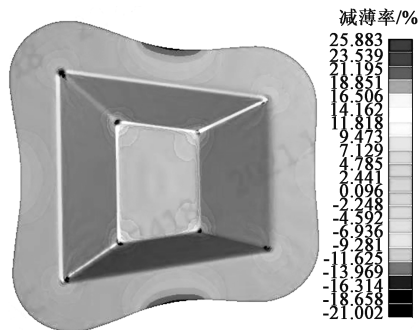


图 3 簸箕形薄壁件单件拉深成形有限元模拟结果
Fig. 3 Finite element simulation results of single piece deep drawing for dustpan-shaped thin-walled part

由图 3 可知，采取单件拉深成形模拟，板料厚度的最大减薄率和最大增厚率分别为 25.883% 和

21.002%，最大减薄率较大，已超过材料厚度的 1/4，板材底部四角 R 区易产生裂纹，最大增厚率超过 1/5，顶部法兰四角 R 区易起皱。

1.2.2 成对拉深成形有限元模拟模型的建立

构建成对拉深成形有限元模拟的凸模、压边圈、毛坯和凹模的三维模型，如图 4 所示。成对拉深成形有限元模拟的毛坯为 297.42 mm×379.24 mm 的矩形，设置的各工艺的参数与单件拉深一致，分别为：凸凹模间隙为 1.60 mm，压边圈与凹模的间隙为 1.65 mm，压边力为 20 kN，成对拉深成形有限元模拟结果见图 5，最大减薄率为 20.882%，最大增厚率为 19.437%。

对比图 3 和图 5 的拉深成形有限元模拟结果可知，单件拉深一次仅可成形出 1 件零件，而成对拉深一次可成形出 2 件零件，加工效率提升 1 倍，采用成对拉深 2 件零件，毛坯尺寸节约 106215.481 mm²，材料利用率提升 48.498%，成对拉深的材料厚度的最大减薄率降低 5.001%。

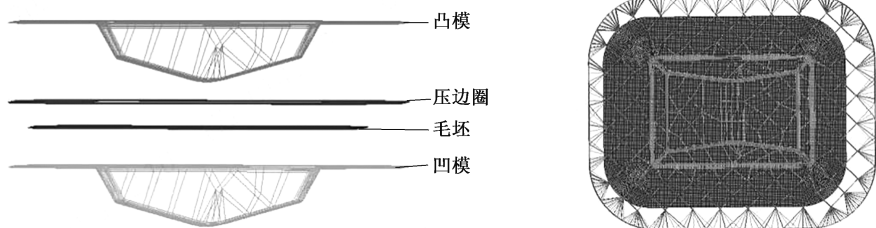


图 4 簸箕形薄壁件成对拉深成形三维有限元模拟模型
Fig. 4 3D finite element simulation model of paired deep drawing for dustpan-shaped thin-walled part

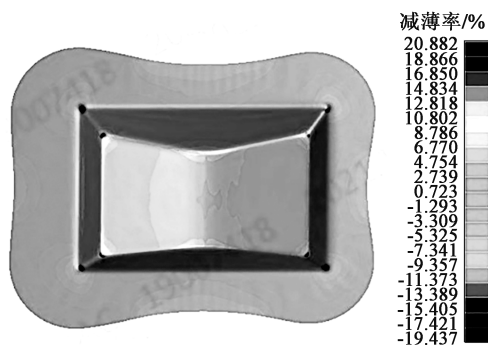


图 5 簸箕形薄壁件成对拉深成形有限元模拟结果
Fig. 5 Finite element simulation results of paired deep drawing for dustpan-shaped thin-walled part

成对拉深与单件拉深相比，具有成形效率高、节约原材料成本、最大减薄率低的优势，因此，最终采取成对拉深成形的方案。由上文可知，该材料的厚度方向易产生减薄、破裂缺陷，必须优化工艺

参数，严格控制材料的减薄率，防止板材破裂。

2 工艺参数的确定

2.1 毛坯尺寸的确定

拉深成形毛坯的尺寸、几何形状对板料成形质量的影响显著。王凤琴等^[14]在研究毛坯对盒形零件拉深成形的影响时分别选择了圆形、方形、八角形毛坯。选择圆形毛坯拉深时，侧壁相对其他部位最不易发生破裂，但在凸缘圆角区最易出现起皱缺陷；采用方形毛坯拉深时，侧壁相对最易发生破裂，且在凸缘直边区易起皱；采用八角形毛坯成形时，板料的变形情况相对均匀，且可通过优化修边余量和切角量来改善成形质量。板料拉深成形的理想状态是板料厚度变化为零，显然是不可能的。实际生产中，可通过合理的方法将板料厚度的变化量控制在

一个可以接受的范围内^[15-16]。

综上,最终确定采用八角形毛坯进行拉深有限元模拟,毛坯尺寸取值分别为 297.42 mm×379.24 mm、

277.42 mm×359.24 mm、257.42 mm×339.24 mm、234.02 mm×306.83 mm,模拟结果分别如图 6a、图 6b、图 6c 和图 6d 所示。

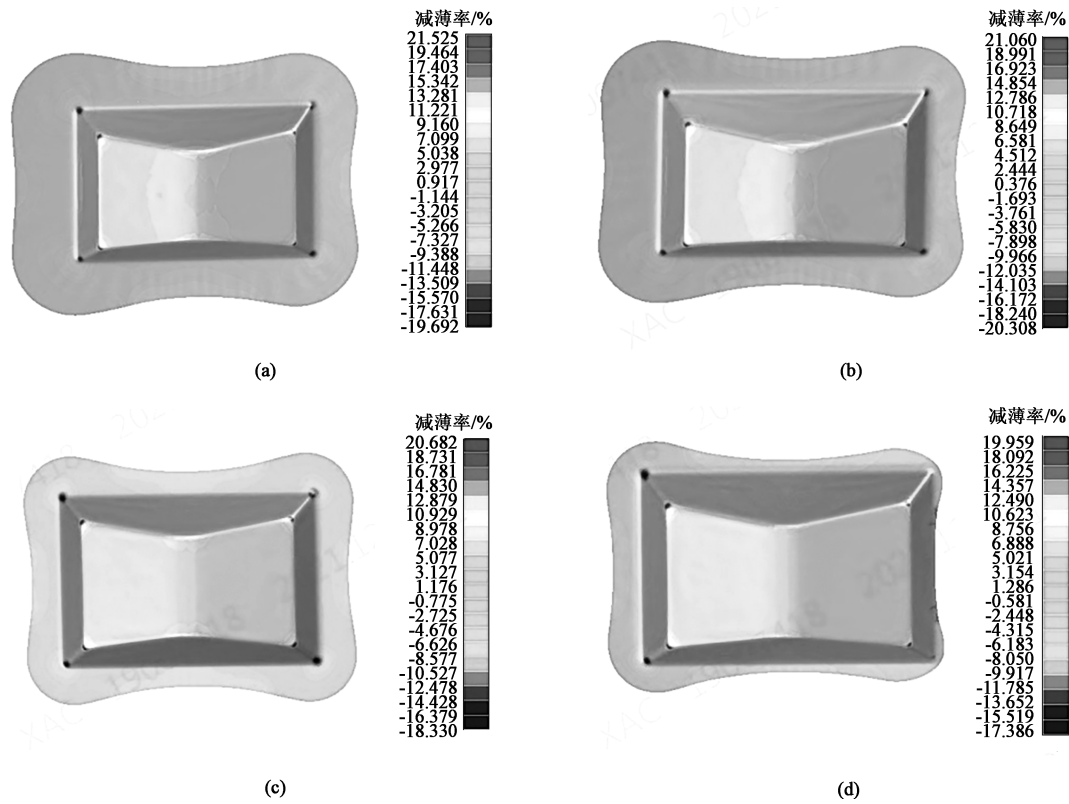


图 6 不同毛坯尺寸的工件的有限元模拟结果

(a) 297.42 mm×379.24 mm (b) 277.42 mm×359.24 mm (c) 257.42 mm×339.24 mm (d) 234.02 mm×306.83 mm

Fig. 6 Finite element simulation results of workpieces with different blank sizes

分析图 6 中的 4 组有限元模拟结果可知,随着毛坯尺寸的减小,最大减薄率逐渐减小,因为减小毛坯面积实际上即减小了法兰区的面积,使拉深成形压边力的作用减小^[17]。因此,必须选择最佳毛坯尺寸以控制裂纹和起皱的产生。对比图 6a、图 6b、图 6c 和图 6d 的模拟结果可得出,图 6d 中零件的成形质量较好,但因法兰区的面积过小,中间位置两侧法兰区偏移不对称,需进一步优化毛坯尺寸和外形。通过分析法兰区缺料的位置和具体尺寸,修整板料外形和尺寸,最终确定的最佳毛坯尺寸为 237.42 mm×319.24 mm,如图 7 所示,法兰区缺陷消失,工件外形规则。

2.2 凸凹模间隙的确定

凸凹模间隙一方面对板料拉深成形的质量和尺寸精度产生影响,另一方面影响模具的寿命,关系到拉深成形能否顺利进行。凸凹模间隙通常应大于板料的厚度,当间隙过大时,拉深作用力降低,对板料的校直和挤压作用减小,虽然模具寿命得到提

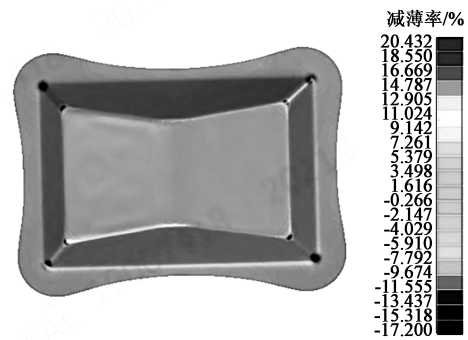


图 7 最佳毛坯尺寸工件的有限元模拟结果

Fig. 7 Finite element simulation results of workpiece with optimal blank size

高,但会产生工件侧壁不直、尺寸精度低的问题;当间隙过小时,板料在模具间受到挤压,使工件严重变薄、断裂,还会引起板料与模具间产生较大的摩擦力,加剧模具的磨损,摩擦力的增大会导致拉深力增大,使板料成形更加困难。因此,凸凹模间隙过大或过小均会使工件产生缺陷,应选用合理的凸凹模间隙^[18]。

在其他参数不变的条件下, 本文分别取凸凹模间隙 1.50、1.55、1.60、1.65、1.70、1.75 和 1.80 mm 进行拉深成形的有限元模拟, 分析凸凹模间隙对板材拉深成形的影响, 模拟结果如图 8 所示。

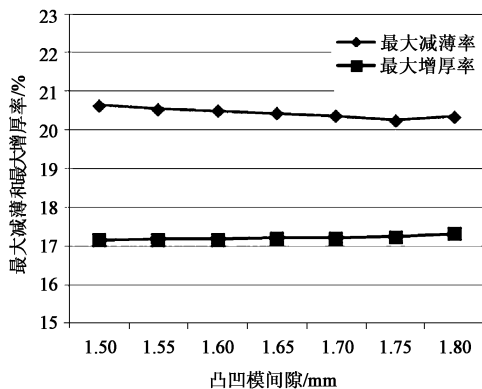


图 8 凸凹模间隙与最大减薄率、最大增厚率的关系曲线

Fig. 8 Relation curves between clearance of punch and die and maximum thinning rate and maximum thickening rate

由图 8 可知: 当凸凹间隙小于 1.75 mm 时, 随着凸凹模间隙的增大, 板料厚度的最大减薄率逐渐减小; 凸凹间隙在 1.75~1.80 mm 之间时, 最大减薄率逐渐增大; 凸凹间隙为 1.75 mm 时, 最大减薄率最小; 凸凹间隙在 1.75~1.80 mm 之间时, 板料厚度的最大增厚率总体无显著变化。因此, 对于本文拉深成形工艺参数中的凸凹间隙, 其合理取值为 1.75 mm。

2.3 压边力的确定

压边力是板材拉深中一个重要的参数, 压边力除可以抑制板材厚度方向的起皱外, 还可以作用于压边圈, 使其与模具接触而产生摩擦力以控制板材的流动, 必须设置适宜的压边力以得到高质量的产品。

本文选取压边力分别为 2、5、10、20、30、40、50 和 60 kN 进行拉深成形有限元模拟, 得到压边力与最大减薄率和最大增厚率的关系, 如图 9 和图 10 所示。

由图 9 和图 10 可知, 压边力小于 5 kN 时, 随着压边力的逐渐增大, 最大减薄率迅速降低, 而最大增厚率也迅速降低。这是因为在该区间内, 压边力过小, 压扁圈对板料的作用力小, 对板料的校直和挤压作用小, 材料起皱严重。压边力在 5~20 kN 范围内时, 随着压边力的增大, 总体上最大减薄率逐渐增大、最大增厚率逐渐降低。压边力在 20~50 kN 范围内时, 最大减薄率逐渐减小而最大增厚率总体保持稳定。通过对比最大减薄率和最大增厚率的值和变化规律, 最终确定压边力的最佳取值为 50 kN。

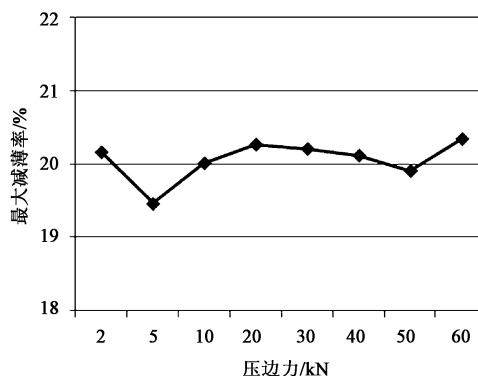


图 9 压边力与最大减薄率的关系曲线

Fig. 9 Relation curve between blank holder force and maximum thinning rate

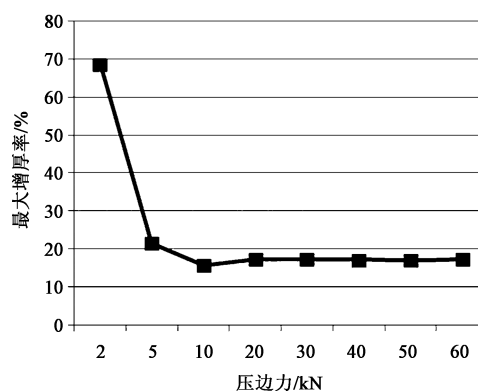


图 10 压边力与最大增厚率的关系曲线

Fig. 10 Relation curve between blank holder force and maximum thickening rate

2.4 最佳参数模拟验证

在有限元模拟软件 DYNAFORM 的前置处理模块中设置上文确定的各项最佳参数: 毛坯尺寸为 297.42 mm × 379.24 mm, 凸凹模间隙为 1.75 mm, 压边力为 50 kN。通过有限元模拟验证本文研究的 2A16 铝合金簸箕形薄壁件成形工艺方案和工艺参数的合理性, 模拟结果如图 11 所示。

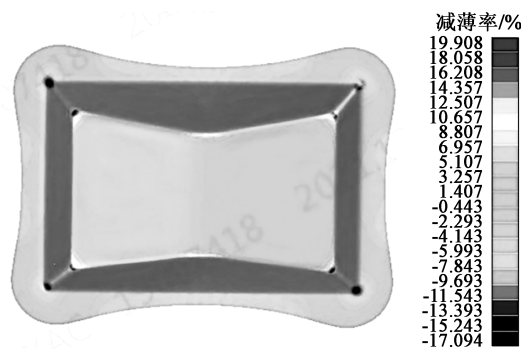


图 11 最佳工艺参数下工件的有限元模拟结果

Fig. 11 Finite element simulation results of workpiece with optimal process parameters

由图 11 所示的有限元模拟结果可知,采用成对拉深成形工艺方案和最佳工艺参数模拟成形的零件的外观平整、形状规则、表面无明显的起皱或裂纹缺陷,板料的最大减薄率和最大增厚率由单件拉深成形的 25.883% 和 21.002% 减小至 20.000% 以下。

3 模具设计及实验验证

3.1 模具设计

图 12 为依据上文确定的各项最佳工艺参数

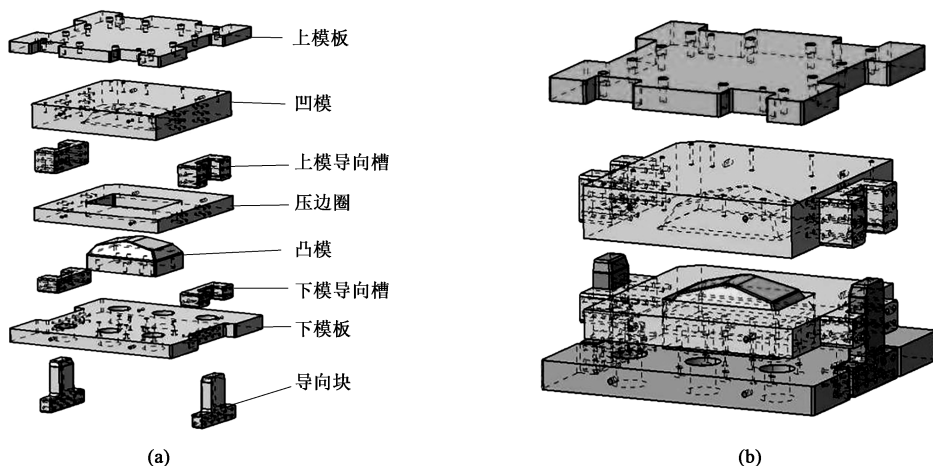


图 12 拉深模具结构的三维模型

(a) 装配前 (b) 装配后

Fig. 12 Three-dimensional model of deep drawing die structures

(a) Before assembly (b) After assembly

3.2 实验验证

为验证模具结构和各工艺参数的合理性,本实验选择尺寸为 237.42 mm×319.24 mm 的最佳毛坯,进行拉深成形实验。图 13 为最终拉深成形的工件实物,观察实物底部四角和顶部法兰四角 R 区无起皱或裂纹现象,工件表面平整,与模拟结果吻合,验证了成对拉深成形方案和模拟结果的可靠性。



图 13 簸箕形薄壁件成对拉深成形实物图

Fig. 13 Physical drawing of paired deep drawing for dustpan-shaped thin-wall part

设计的拉深模具结构的三维模型。模具主要包含上模板、凹模、上模导向槽、压边圈、凸模、下模导向槽、下模板和导向块。模具采用装配于凹模的上模导向槽、装配在压边圈上的下模导向槽和导向块导向,下模板定位在机床工作台,压边圈与顶杆组成的组件提供反向压边力及拉深成形结束后的卸料。凹模随上模板向下移动,与压边圈共同压紧毛料,随着凹模和压边圈继续下行,凹模内型面与凸模外型面配合共同完成工件成形。

4 结论

(1) 采用 DYNIFORM 有限元模拟软件分别对 2A16 铝合金簸箕形薄壁件的单件拉深成形和成对拉深成形进行有限元模拟。通过对比两种成形方案的模拟结果,发现采用成对拉深成形的加工效率提升 1 倍,材料利用率提升 48.498%,确定了成对拉深成形的工艺方案。

(2) 建立不同毛坯尺寸的有限元模型进行成对拉深成形模拟,通过对比不同毛坯尺寸的板材的最大减薄率,确定最佳毛坯尺寸为 237.42 mm × 319.24 mm。

(3) 模拟分析出不同凸凹模间隙和压边力下成对拉深成形的最大减薄率、最大增厚率的变化规律,结合不同工艺参数下的具体数据得出:凸凹间隙小于 1.75 mm 时,随着凸凹间隙的增大,板料厚度的最大减薄率逐渐减小;凸凹间隙在 1.75 ~ 1.80 mm

之间时, 最大减薄率逐渐增大; 间隙为 1.75 mm 时, 最大减薄率最小; 凸凹间隙在 1.75~1.80 mm 之间时, 最大增厚率无显著变化。确定凸凹间隙的合理取值为 1.75 mm。

(4) 压边力小于 5 kN 时, 随压边力的增大, 板料的最大减薄率和最大增厚率降低较快; 压边力在 5~20 kN 范围内时, 最大减薄率逐渐增大、最大增厚率逐渐降低; 压边力在 20~50 kN 范围内时, 最大减薄率逐渐减小而最大增厚率总体保持稳定。通过对比最大减薄率和最大增厚率的变化规律和具体数值, 确定压边力的最佳取值为 50 kN。

(5) 确定最优工艺参数为: 毛料尺寸为 237.42 mm×319.24 mm、凸凹间隙为 1.75 mm、压边力为 50 kN。通过实验验证了成对拉深成形方案和模拟结果的可靠性, 为铝合金簸箕形薄壁件的加工提供了技术参照。

参考文献:

- [1] Cole G S, Sherman A M. Light weight materials for automotive applications [J]. *Materials Characterization*, 1995, 35 (1): 3-9.
- [2] 杨希英, 郎利辉, 郭禅, 等. 2A16 铝合金锥形件多级充液热成形仿真及优化分析 [J]. *精密成形工程*, 2014, 6 (6): 72-77.
Yang X Y, Lang L H, Guo C, et al. Simulation and optimization analysis of multistage liquid filling hot forming of 2A16 aluminum alloy conical parts [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2014, 6 (6): 72-77.
- [3] 邓鹏辉, 张世兴. 固溶处理对 2A16 铝合金显微组织和性能的影响 [J]. *装备制造技术*, 2009, (9): 36-38.
Deng P H, Zhang S X. Effect of solution treatment on microstructure and properties of 2A16 aluminum alloy [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2009, (9): 36-38.
- [4] Starke E A, Staley J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1996, 32 (2-3): 131-172.
- [5] Heinz A, Haszler A, Keidel C, et al. Recent development in aluminium alloys for aerospace application [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 280 (1): 102-107.
- [6] Belov N A, Alabin A N, Matveeva I A. Optimiation of phase composition of Al-Cu-Mn-Zr-Sc alloys for rolled products without requirement for solution treatment and quenching [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 583: 206-213.
- [7] Malavizhi S, Balasubramanian V. Effect of welding processes on AA2219 aluminum joint properties [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21 (5): 962-973.
- [8] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20 (9): 1705-1715.
Liu B, Peng C Q, Wang R C, et al. Research status and prospect of aluminum alloy for large aircraft [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20 (9): 1705-1715.
- [9] 任丽萍. 高强韧铸造铝合金组织与性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2014.
Ren L P. Study on Microstructure and Properties of High Strength and Toughness Cast Aluminum Alloy [D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [10] 龚习, 王恒强, 付敏敏, 等. 航空航天用 Al-Cu-Mn 系高强铝合金的研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2015, 44 (22): 6-10.
Gong X, Wang H Q, Fu M M, et al. Research progress of Al-Cu-Mn high strength aluminum alloys for aerospace applications [J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44 (22): 6-10.
- [11] 张喆, 洪润洲, 周永江, 等. 高强铝合金薄壁件熔铸工艺 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42 (9): 78-80.
Zhang Z, Hong R Z, Zhou Y J, et al. Melting and casting process of high strength aluminum alloy thin-walled parts [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42 (9): 78-80.
- [12] 何移峰. LY16 铝合金抛物线曲面薄壁零件充液拉深成形工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
He Y F. Study on Liquid Filled Deep Drawing Process of LY16 Aluminum Alloy Thin-wall Parts with Parabolic Curved Surface [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [13] 王燕齐. 6061 铝合金板材冲压性能与伺服成形工艺研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
Wang Y Q. Research on Stamping Performance and Servo Forming Process of 6061 Aluminum Alloy Sheet [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [14] 王凤琴, 赵军, 官英平. 毛坯外形对盒形件拉深成形的影响 [J]. *中国机械工程*, 2003, 14 (7): 619-622.
Wang F Q, Zhao J, Guan Y P. Effect of blank shape on deep drawing of box parts [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 14 (7): 619-622.
- [15] 郝明刚. 方盒形件拉深压边力与摩擦的数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
Hao M G. Numerical Simulation of Blank Holder Force and Friction in Square Box Drawing [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [16] 薛敞翔. 冲压模具设计制造难点与窍门 [D]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
Xue C X. Difficulties and Tips of Stamping Die Design and Manufacturing [D]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [17] 石美华. 薄壁盒形件法兰区起皱影响因素的有限元模拟研究 [J]. *现代制造工程*, 2013, 6 (1): 91-95.
Shi M H. Finite element simulation study on influence factors of flange wrinkling in thin-walled box parts [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2013, 6 (1): 91-95.
- [18] 陈珏. 高强钢矩形件拉深成形的数值模拟研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2013.
Chen J. Numerical Simulation Research on Deep Drawing of High Strength Steel Rectangular Parts [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2013.