

# 凸轮盖板零件主动式充液成形仿真、试验及微观组织研究

李欣聪<sup>1,2</sup>, 张虹桃<sup>2</sup>, 曾一畔<sup>2</sup>, 徐 杨<sup>2</sup>, 谢兰生<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 211106; 2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092)

**摘要:** 以飞机凸轮盖板零件为研究对象, 根据零件的几何尺寸, 利用商业 Catia 软件建立其三维模型, 并结合网格剖分软件和 Dynaform 有限元软件, 进行主动式充液成形仿真、试验及微观组织和力学性能研究。基于增量有限元法, 根据不贴模和回弹的变形情况, 对主动式充液成形中加载与卸载回弹过程的变形进行了工艺仿真分析, 设计了主动式充液成形模具, 研究了工艺参数对零件成形质量和回弹的影响规律。在最佳的工艺参数下, 制备了凸轮盖板零件实物, 研究了其周向和法向的硬度值、厚度值和微观组织, 并得到了相关的变化规律, 为主动式充液成形工艺设计与优化奠定理论基础。

**关键词:** 凸轮盖板; 主动式充液成形; 微观组织; 力学性能; 回弹

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.008

**中图分类号:** TG146.22      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0053-07

## Simulation, test and microstructure research on active hydroforming for cam cover plate part

Li Xincong<sup>1,2</sup>, Zhang Hongtao<sup>2</sup>, Zeng Yipan<sup>2</sup>, Xu Yang<sup>2</sup>, Xie Lansheng<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;  
2. AVIC Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**Abstract:** For the aircraft cam cover plate part, according to the geometric dimensions of part, a 3D model was established by using commercial software Catia, the simulation and test of the active hydroforming were conducted, and the microstructure and mechanical properties were studied by combining mesh splitting software and finite element software Dynaform. Then, based on the incremental finite element method and according to the deformation condition of non-die adhesion and springback, the deformation during the loading and unloading springback process in the active hydroforming was analyzed by process simulation. Furthermore, the active hydroforming die was designed, and the influence law of process parameters on the forming quality and springback of part was studied. Finally, under the optimal process parameters, the actual cam cover plate parts were prepared, and the hardness values, thickness values and microstructures of cam cover plate along the circumferential and normal directions were studied, and the relevant change rules were obtained, which lays a theoretical foundation for the design and optimization of the active hydroforming process.

**Key words:** cam cover plate; active hydroforming; microstructure; mechanical property; springback

随着航空制造领域的不断发展, 对尺寸精度、表面质量和疲劳寿命等的要求也逐渐提高, 传统的落锤成形技术已不再满足先进战机的高要求<sup>[1-3]</sup>。充液成形技术是利用柔性介质代替刚性凹模或凸模, 将载荷直接作用于板料, 避免了板料与零件直接刚性接触, 是一种能有效提高零件表面质量和成形极限的先进成形工艺。充液成形可实现飞机零件中许

多形状复杂的钣金零件<sup>[4-5]</sup>。充液成形技术主要分为主动式充液成形和被动式充液成形。主动式充液成形技术利用柔性介质代替刚性凸模, 适用于浅腔或平缓过渡的型面类零件。被动式充液成形技术利用油或水等柔性介质代替刚性凹模, 常被用作成形深腔或型面变化剧烈的复杂薄壁零件。相比于落锤成形、冲压成形等传统钣金成形技术, 充液成形技术可一次成形零件和保证板料的内部结构组织完整, 可提高零件的疲劳寿命及可靠性, 具有回弹小、材料易成形、表面质量高、成形极限高等优点<sup>[6-8]</sup>。

冯瑶等<sup>[9]</sup>以 5182 铝合金制备汽车引擎内板为例, 通过 Dynaform 软件对引擎内板充液成形工艺进行有限元仿真、试验验证和工艺优化, 得到具有良

收稿日期: 2023-01-31; 修订日期: 2023-05-08

基金项目: 四川省科技计划项目 (201906028--2018GZ0063/01)

作者简介: 李欣聪 (1989-), 男, 工学学士, 高级工程师

E-mail: fuxiu012@qq.com

通信作者: 谢兰生 (1965-), 男, 博士, 教授

E-mail: meelsxie@nuaa.edu.cn

好贴模度和表面质量优良的内板零件。曾一畔等<sup>[10]</sup>利用 2A12-O 铝合金材料,通过非线性有限元仿真软件对不同加载路径下的某铝合金航空零件的充液成形过程进行了数值仿真和试验验证,认为线性加载路径时,零件容易开裂,难成形;脉动加载路径下零件成形显著且易于贴模,采用梯形波脉动加载时,成形零件具有均匀的壁厚,表面质量最佳,满足工业生产要求。邱超斌等<sup>[11]</sup>利用 DYNAFORM 有限元仿真软件建立了某船形深腔薄壁构件充液成形过程的有限元模型,探究了最大液室压力、压边间隙和初始反胀压力等关键工艺参数对成形结果的影响规律,得到了最佳的优化工艺参数:最大液室压力为 4 MPa,初始反胀压力为 0 MPa,压边间隙为 2.2 mm,制备出表面质量优良的船形零件。

目前,众多学者仅对主动式充液成形过程的仿真和成形机理进行了研究,但未对成形后制件的力学性能和微观组织进行研究<sup>[12-16]</sup>。因此,本文以航空凸轮盖板零件为研究对象,根据材料参数及凸轮盖板零件的几何尺寸,利用商业软件 Catia 建立其三维模型。并结合网格剖分软件和 Dynaform 有限元仿真软件,进行凸轮盖板零件主动式充液成形仿真分析,工艺仿真基于增量有限元法,并根据变形情况(起皱、破裂、不贴模和回弹等),分析加载成形与卸载回弹过程的变形情况与应力分布,研究典型特征零件主动式充液成形过程中的缺陷形式和产生机理,确定主动式充液成形模具和加工参数对产品成形质量及回弹效应的影响,为工艺设计及最佳化奠定理论依据。

## 1 材料力学性能及理论分析

### 1.1 材料力学性能

本次试验采用主动式充液成形与橡皮囊液压校形复合工艺方案制备凸轮盖板,其材料是厚度为 1.0 mm 的 2024-O 态铝合金,由西南铝业(集团)有限责任公司提供。2024-O 态铝合金是可热处理的高强铝合金,具有良好的可焊接性、耐腐蚀性和切割加工性能,常被用于飞机口盖、铆钉、蒙皮和翼梁等零件。本次试验的所有材料均采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测量实际成分,如表 1 所示。

为防止板料零件出现各向异性和试验偶然性,本次试验选择沿轧向分别呈 0°、45°和 90°的 3 个方向的 3 组室温单向拉伸试样,取样尺寸及试样加工

表 1 2024-O 态铝合金主要化学成分(%,质量分数)

Table 1 Main chemical components of 2024-O state aluminium alloy(%, mass fraction)

Cu	Mg	Zn	Si	Al
4.10	1.50	0.25	0.50	余量

方法参考 GB/T 228.1—2010<sup>[17]</sup>。采用 MTS-CMT5105 万能拉伸机,在加载速度为 0.48 mm·min<sup>-1</sup>条件下进行室温拉伸试验,得到的 2024-O 态铝合金材料的力学性能如表 2 所示。由表 2 可知,2024-O 态铝合金板材在与沿轧向呈 0°、45°和 90°方向上的材料的各向异性指数变化不大,即没有明显的各向异性现象。因此,本文选取 0°方向上的真应力-真应变曲线作为模拟中输入的材料力学性能。

表 2 2024-O 态铝合金板材的力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of 2024-O state aluminium alloy sheet

取向/ (°)	屈服强度 $R_{el}/$ MPa	抗拉强度 $R_m/$ MPa	伸长率 $A/$ %	厚向异性 指数 $r$	应变强化系数 $K/$ MPa	硬化指数 $n$
0	64±2	120±6	19.2±0.2	0.55±0.4	220±7	0.18±0.03
45	68±1	128±5	19.9±0.6	0.59±0.3	217±5	0.19±0.04
90	63±1	124±2	19.1±0.4	0.58±0.2	228±4	0.22±0.05

### 1.2 凸轮盖板零件特征

凸轮盖板零件的数值模拟图如图 1 所示,该零件材料为 2024-O 态铝合金,板料厚度为 1.0 mm。该零件的拉深深度的  $h$  为 4.287 mm,外径  $d$  为  $\Phi 147$  mm,凸模和凹模的圆角半径  $R$  均为 6.35 mm。主动式充液成形后圆角位置易过度减薄,中部和圆角位置容易产生回弹。

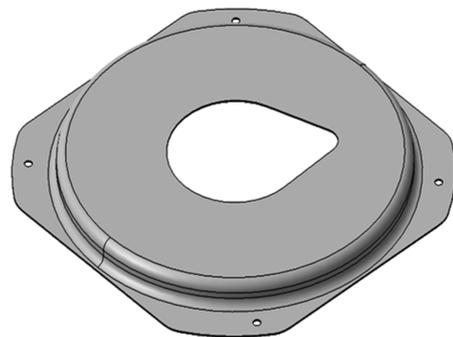


图 1 凸轮盖板零件的数值模拟模型

Fig. 1 Numerical simulation model of cam cover plate part

### 1.3 工艺分析过程

首先,采用 CATIA 软件进行凸轮盖板零件的型

面设计, 再利用板料成形模拟仿真专用软件 Dynaform 进行凸轮盖板典型有限元模拟。因增量理论效率高, 被广泛应用于材料的非线性应力、应变行为计算, 对于板料成形的适用性高。本文采用的凸轮盖板局部区域具有明显的变形, 故采用增量有限元法进行仿真。网格划分中计算目标的匹配程度和网格质量, 决定了后期有限元计算的质量。模具网格划分采用单元法, 将模具表面离散为有限单元, 从而将接触搜索问题归结为直线和平面相交问题。此方法占用资源少、接触搜索问题处理方便、便于有限元系统的数据交互。

板料与模具圆角接触部分的单元尺寸相对于接触阻尼参数、罚参数和虚拟冲压速度等参数对回弹结果的影响较大, 为确保精度, 在圆角部分每  $5^\circ$  对

应一个网格, 此外采用矩形网格可以提高回弹计算的精度。

在 LS-DYNA 中采用自适应网格划分技术, 在分析过程中网格根据变形情况及剧烈程度自动细化。计算公式为:

$$\frac{\text{自适应划分}}{\text{后单元尺寸}} = \frac{\sqrt{2} \times \text{最小圆角半径 } R_{\min}}{90^\circ \text{ 圆角上需要的单元数}} \quad (1)$$

$$\frac{\text{自适应划分}}{\text{前单元尺寸}} = \text{自适应划分后单元尺寸} \times 4^{\text{划分级别}-1} \quad (2)$$

网格划分完成后, 需要检查单元的长宽比及翘曲角等, 并且对尖角、翘曲短边和缝隙等进行修补, 最终得到法兰部分做压料面, 并将其扩大即可。导入有限元软件后自动偏置生成压边圈, 如图 2 所示。

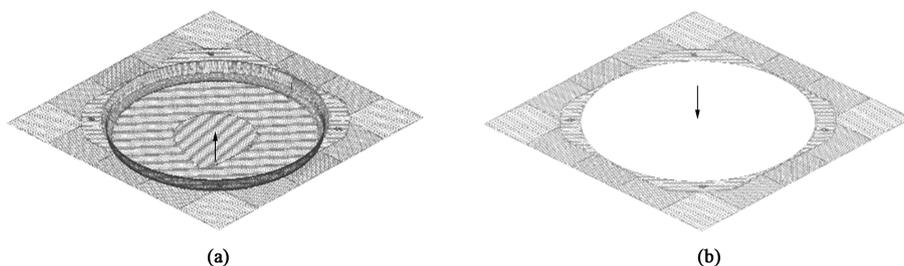


图 2 凸轮盖板零件的凹模 (a) 和压边圈 (b) 的数值模拟模型

Fig. 2 Numerical simulation models of die (a) and blank holder (b) for cam cover plate part

坯料尺寸通过有限元模拟中的反算法 (一步成形法) 进行计算, 可实现对坯料的可加工性和外形轮廓进行预测。模具定义为刚体材料, 板料采用壳单元, 材料采用各向同性模型, 如图 3 所示。

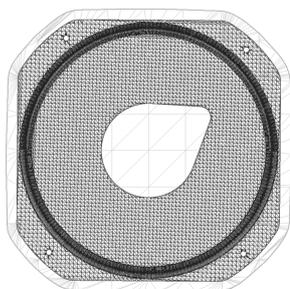


图 3 一步成形法反算的坯料模型

Fig. 3 Blank model by backward one-step forming method

图 4 展示了凸轮盖板零件主动式充液成形的最终模拟结果。以下将从贴模和回弹两个方面分析模拟结果。

## 2 工艺参数对比分析

根据该零件凹模圆角半径为 6.35 mm, 故仿真

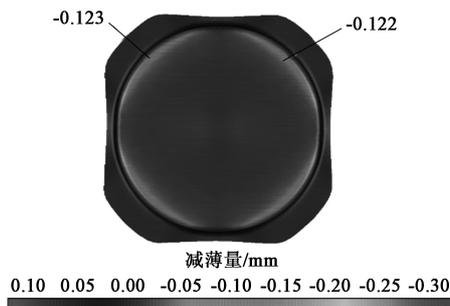


图 4 凸轮盖板零件主动式充液成形的最终模拟结果  
Fig. 4 Final simulation result of active hydroforming for cam cover plate part

最大液室压力分设计为 10、20 和 50 MPa, 如图 5 所示。由图 5a 所示, 当液室压力为 10 MPa 时, 零件圆角半径与最大液室压力线的贴合情况较差。如图 5b 所示, 当液室压力为 20 MPa 时, 零件圆角半径与最大液室压力线的贴合情况有一定改善, 但仍然不满足主动式充液成形的要求。将最大液室压力增加到 50 MPa 时, 零件圆角半径与最大液室压力线贴合良好, 满足主动式充液成形的要求, 如图 5c

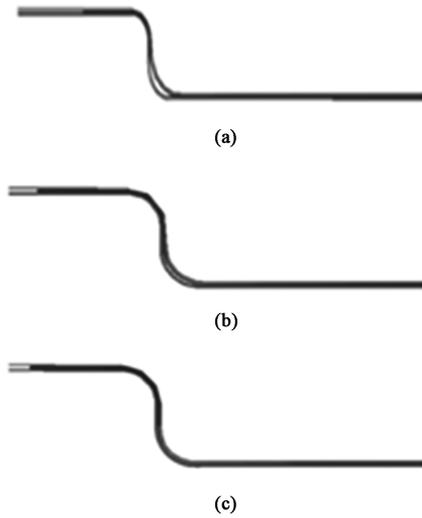


图 5 不同液室压力下的贴模情况

(a) 10 MPa (b) 20 MPa (c) 50 MPa

Fig. 5 Die fittingness with different liquid chamber pressures

所示。故选取 50 MPa 作为最终液室压力，并进行保压以减小回弹。

该零件采用主动式充液成形技术，零件的最大成形深度为 4.287 mm，圆角部位局部贴模困难，且由于零件腹板面中部刚性差和圆角位置容易产生回弹，为增大贴模程度、减小回弹，选取最大液室压力为 50 MPa，液室压力加载曲线如图 6 所示。

当采用最佳的最大液室成形压力 50 MPa 时，凸轮盖板零件仿真模拟成形后，零件底部中心回弹量最大为 0.824 mm，不满足成形要求，如图 7 所示。

为了更好地成形零件，在模拟回弹补偿时，压料面固定，对底面进行补偿。每次补偿的补偿因子

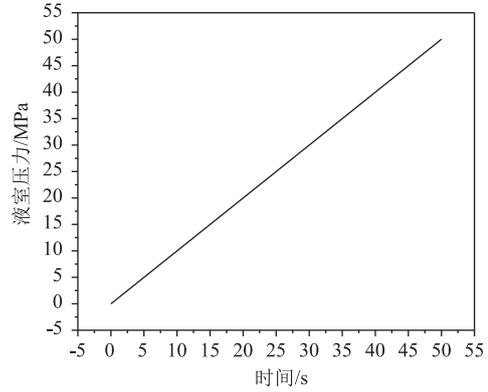


图 6 液室压力加载曲线

Fig. 6 Loading curve of liquid chamber pressure

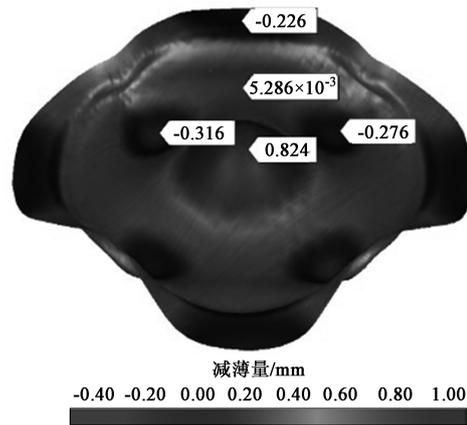


图 7 凸轮盖板零件回弹情况

Fig. 7 Springback situation of cam cover plate part

均设置为 1，为保证补偿后曲面的圆滑，设置光顺因子为 0.5。如图 8a 所示，当第 1 次补偿时，零件底部中心的回弹量为 0.585 mm，有一定改善，但仍然不满足要求。当进行第 2 次补偿时，零件受到塑

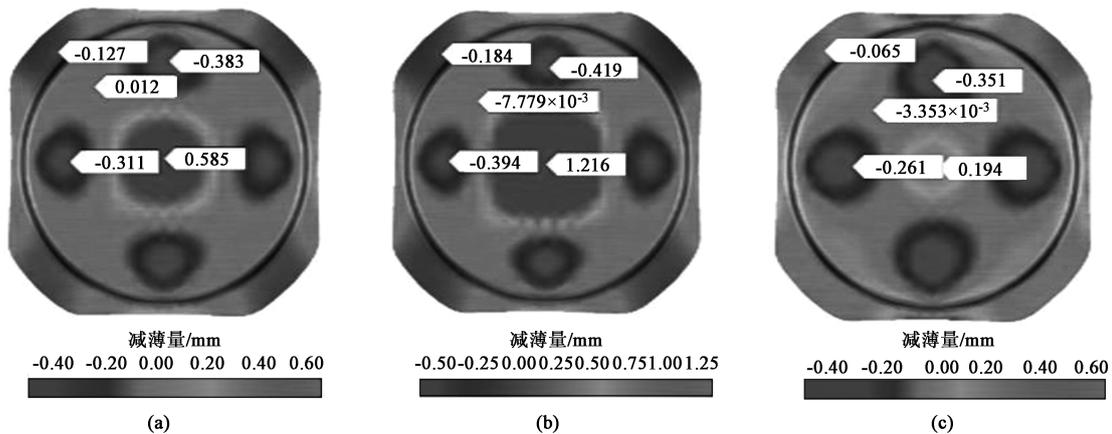


图 8 凸轮盖板零件回弹补偿情况

(1) 第 1 次 (2) 第 2 次 (3) 第 3 次

Fig. 8 Springback compensation situation of cam cover plate part

(1) The first time (2) The second time (3) The third time

性变形的影响, 底部回弹量增加, 约为 1.216 mm, 仍然不满足要求, 如图 8b 所示。当进行第 3 次补偿时, 整个零件的回弹量控制在  $\pm 0.360$  mm 以内, 满足成形要求, 如图 8c 所示。

根据图 8 数值模拟结果可知: (1) 该零件通过主动式充液成形能够一次成形, 最大减薄率可以控制在 10% 以内; (2) 该零件的底部面积较大且圆角较小, 底部及圆角部分容易产生回弹, 回弹量在 0.800 mm 左右; (3) 针对回弹较大的情况, 可通过增大压边力、设置拉延筋、增大液室压力等手段来增大板料的拉延成分以减少回弹; (4) 回弹补偿经过 3 次后收敛, 回弹量可控制在  $\pm 0.360$  mm 以内。

### 3 成形模具设计

根据该零件的材料信息、仿真结果、反切内样板和外形样板设计数模, 设计了主动式充液成形模具, 如图 9 所示, 在 SLC4000 主动式充液成形机床上采用主动式充液成形技术制造凸轮盖板零件。模具采用 45 钢, 具体技术要求如下。(1) 上模键槽要求: 键槽宽度为 12.2 mm 且必须取正差, 公差要求为  $+0.2 \sim 0.4$ , 键槽深度为 6 mm, 键槽长度  $\geq 20$  mm, 键槽的位置必须在模具中心线上。(2) 下模键槽要求: 键槽宽度为 12.2 mm 且必须取正差, 公差要求为  $+0.2 \sim 0.4$ , 键槽深度为 10 mm 且必须取正差, 公差要求为  $+0.2 \sim 0.4$ , 两键槽间的长度  $\leq 90$  mm, 下模键槽以漏水孔为中心。(3) 模具间隙要求: 垫块高度与型面齐平。(4) 模具粗糙度要求: 上

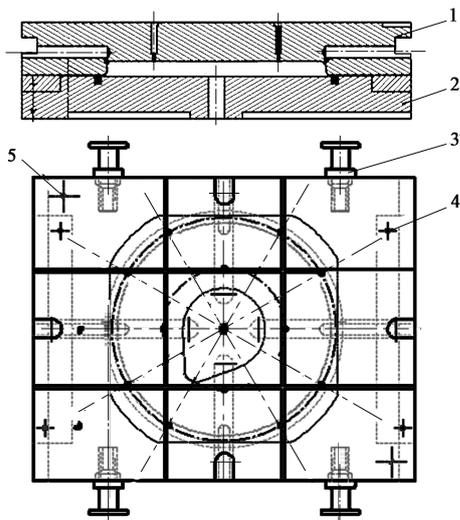


图 9 凸轮盖板零件的主动式充液成形模具

1. 凹模 2. 压边圈组件 3. 对模销 4. 起重螺栓 5. 螺钉

Fig. 9 Die of active hydroforming for cam cover plate part

模的内型面及法兰区要求达到镜面, 粗糙度要求为  $Ra0.4 \mu\text{m}$ , 下模零件法兰区要求光滑, 粗糙度要求为  $Ra0.8 \mu\text{m}$ 。(5) 其他要求: 零件排气孔均匀分布, 不设计卸料管组件; 在压边上刻出零件展开示意线; 模具加工完成后, 对漏水孔的铁屑必须进行清除。

### 4 成形试验及综合力学性能分析

#### 4.1 成形试验

在 SCL4000 主动式充液成形设备上开展成形试验: (1) 第 1 次试模记录显示成形后零件圆角处破裂, 分析原因为压边力过大, 调低 30% 压边力; (2) 第 2 次试模记录显示成形后零件中间部位鼓动较大, 分析原因为凹模中间回弹补偿不够, 在模具中央位置向内修模 1.0 mm, 其余部位平缓过渡; (3) 第 3 次试模记录显示成形后测量的贴模度较好, 中间部位偏移范围在 0.5 mm 内。满足技术要求的凸轮盖板零件的实物图如图 10 所示。

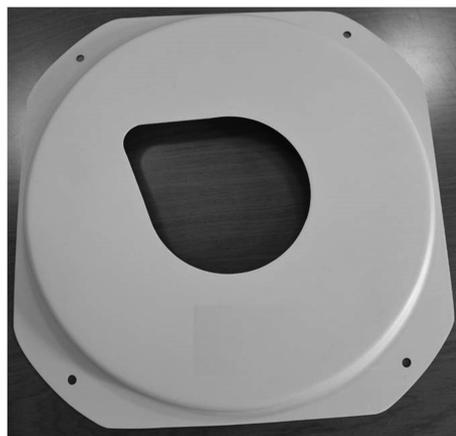


图 10 满足技术要求的凸轮盖板零件

Fig. 10 Cam cover plate part meeting technical requirements

#### 4.2 凸轮盖板零件力学性能分析

图 11 为凸轮盖板零件的硬度和厚度的取样位置, 其中, 1 号~10 号点和 a 号~j 号点分别为法向和周向测试点, 其中法向 3 号点和周向 f 号点为同一点。为了提高试验的可靠性, 随机选取 3 个零件按照法向和周向测试点进行测试, 然后取平均值作为本次试验的结论。

沿法向、周向测试的硬度值如图 12 所示。由图 12 可知, 沿周向方向的硬度值变化较小, 在平均值  $(60.8 \pm 0.3)$  HV 附近波动, 沿法向方向的硬度值先增加至  $(63.6 \pm 0.4)$  HV, 再降低至  $(61.3 \pm 0.5)$  HV, 然后增加至  $(64.3 \pm 0.4)$  HV, 最后降低至  $(60.3 \pm$

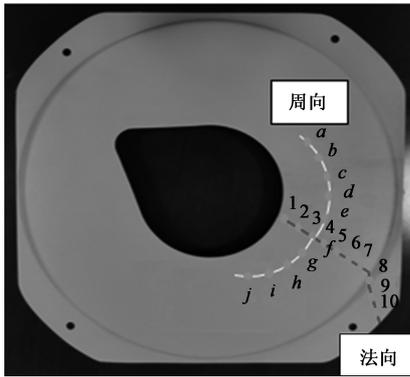


图 11 凸轮盖板零件硬度、厚度标记位置

Fig. 11 Marking positions of hardness and thickness on cam cover part

0.3) HV。沿着法向方向的平均硬度值为  $(62.2 \pm 0.3)$  HV，与周向方向的平均硬度值  $(60.8 \pm 0.3)$  HV 相比，法向方向的平均硬度值有一定增加，其原因可能为：零件发生塑性变形后，根据形变强化原理，硬度值有一定增加。

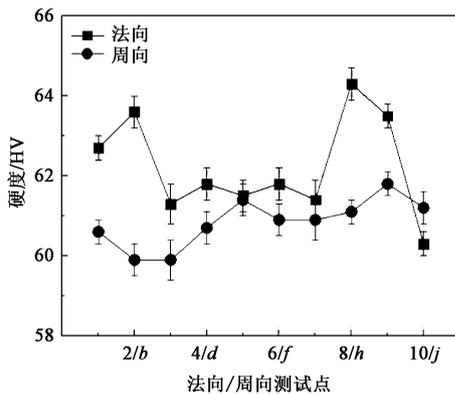


图 12 法向、周向的硬度值测试结果

Fig. 12 Test results of hardness values along normal and circumferential directions

法向和周向的厚度值如图 13 所示。由图 13 可

知，沿着周向的平均厚度值在  $(0.994 \pm 0.006)$  mm 范围内小幅度波动。这可能是周向区域受到塑性变形的影响小，导致其厚度变化小。沿着法向的厚度值开始维持平衡，再增加至  $(1.040 \pm 0.010)$  mm，然后再降低至  $(0.930 \pm 0.010)$  mm，再缓慢增加至  $(0.960 \pm 0.010)$  mm。由于法向受到塑性变形的影响，厚度值变化大。在 7 号点处的硬度值为  $(1.040 \pm 0.010)$  mm，达到最大值，其原因可能是由于在板料成形过程中，受到塑性变形的影响，在 7 号点处板料有一定的堆积，导致该处的厚度增加。

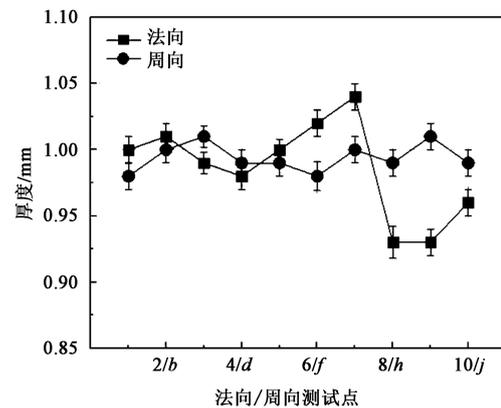


图 13 法向、周向的厚度值

Fig. 13 Thickness values along normal and circumferential directions

根据法向和周向的硬度值和厚度值结果可知，周向的硬度值和厚度值基本无变化，然而法向的硬度值和厚度值因零件变形而产生变化，因此，本次显微组织观察仅针对法向区域进行取样。法向的 3 号（未变形区）和 8 号（变形区）点的金相组织如图 14 所示，与未变形区的晶粒相比，变形区的晶粒有一定程度的拉长趋势，主要沿着变形方向被拉长。根据文献 [18]，这可能是由于变形区有一定的变形，导致晶粒沿着一定的方向被拉长。

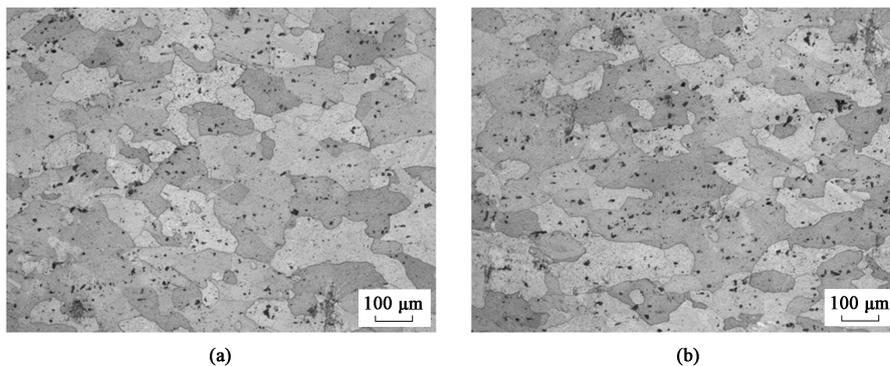


图 14 法向 3 号点 (a) 和 8 号点 (b) 的金相组织

Fig. 14 Metallographic structures of point 3 (a) and point 8 (b) along normal direction

## 5 结论

(1) 该凸轮盖板零件的底部面积较大且圆角较小, 底部及圆角部分容易产生回弹, 回弹量在 0.800 mm 左右, 针对回弹较大的情况, 可通过增大压边力、增大液室压力等手段来增大板料的拉延成分来减少回弹。

(2) 基于数值模拟及成形工艺优化, 成形零件的贴模度较好, 中间部位偏移范围在 0.5 mm 内, 得到满足技术要求的凸轮盖板零件实物。

(3) 与沿着周向的硬度值和厚度值相比, 沿着法向的硬度值和厚度值的变化波动更大, 在变形区域的硬度值和厚度值均有明显的变化。同时, 与未变形区的晶粒相比, 变形区的晶粒有一定程度的拉长趋势, 主要沿着变形方向被拉长。

### 参考文献:

- [1] 胡芷芊, 任奕桐, 戴伟, 等. 基于 CATIA 人机分析的新型战斗机座舱设计评估 [J]. 机械设计, 2022, 39 (8): 155-160. Hu Z Q, Ren Y T, D W, et al. Evaluation of new fighter cockpit design based on CATIA man-machine analysis [J]. Journal of Machine Design, 2022, 39 (8): 155-160.
- [2] Turner B N, Gold S A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II—Materials, dimensional accuracy, and surface roughness [J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21 (3): 250-261.
- [3] Youssef H A, Hofy H A, Abdelaziz A M, et al. Accuracy and surface quality of abrasive waterjet machined CFRP composites [J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55 (12): 1693-1703.
- [4] Trompeter M, Onder E, Homberg W, et al. Material flow control in high pressure sheet metal forming of large area parts with complex geometry details [J]. Steel Research International, 2005, 76 (12): 905-910.
- [5] Gershon B, Eldror I. Research and application of superplastic forming titanium alloys for commercial aircraft parts [J]. Materials Science Forum, 2005, 475-479: 3047-3050.
- [6] 张弛焯, 郎利辉, 闫东东, 等. 纤维增强金属层板成形固化一体化工艺 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 59-67. Zhang C Y, Lang L H, Yan D D, et al. Integration process on forming and curing of fiber-reinforced metal laminates [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 59-67.
- [7] Elyasi M, Bakhshi J M, Gorji A. Mechanism of improvement of die corner filling in a new hydroforming die for stepped tubes [J]. Materials & Design, 2009, 30 (9): 3824-3830.
- [8] Groche P, Metz C. Hydroforming of unwelded metal sheets using active-elastic tools [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168 (2): 195-201.
- [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. Experimental process parameter optimization of liquid filling forming of inner plate of 5182 aluminum alloy hood [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 107-112.
- [10] 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): 181-189. 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): 181-189.
- [11] 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. Research on deformation law of aluminum alloy ship-shaped deep cavity thin-wall component with liquid filling forming [J]. Precision Forming Engineering, 2021, 13 (1): 133-138.
- [12] Mazaideh G M, Shalayel M H, Nour S, et al. In silico anti-fungal efficacy and the mechanism of binding of some Syzygium aromaticum ingredient compounds to aspartate semialdehyde dehydrogenase, 6C8W and 6C85, enzymes from Blastomyces dermatitidis [J]. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 2021, 34 (6): 2219-2226.
- [13] Gopinath K, Narayanamurthy V, Rao Y. Numerical and experimental studies on hydroforming of a thin metallic disc [J]. Materials Science Forum, 2022, 21: 1048-1053.
- [14] 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.
- [15] Afanasiev M S. The mechanism of a film-forming medium during the RF deposition of ferroelectric ceramics of the  $BaxSr_{1-x}TiO_3$  composition [J]. Russian Microelectronics, 2023, 51 (8): 696-700.
- [16] Zeng Y P, Dong J L, He T D, et al. Numerical simulation study on active and passive hydroforming process optimization of box shaped part [J]. Journal of Physics Conference Series, 2016, 734 (3): 032084.
- [17] 乐金涛, 李玲, 刘乐. 对拉伸试验方法标准 GB/T 228.1—2010 的思考 [J]. 理化检验: 物理分册, 2015, 51 (2): 83-86, 91. Le J T, Li L, Liu L. Consideration about the tensile test method standard of GB/T 228.1—2010 [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2015, 51 (2): 83-86, 91.
- [18] 周珺玉. 冷轧 AA6061 铝合金的组织、微米压痕与腐蚀性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2018. Zhou D Y. The Textures, Micro-indentation and Corrosion Properties of Cold-rolled AA6061 Aluminum Alloy [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.