

复杂大尺寸蒙皮纵向拉伸成形数值模拟及工艺优化

张海宝, 韩艳彬, 杜志浩, 朱宏斌

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要: 为解决大尺寸双曲率蒙皮拉伸成形过程中采用传统的经验法进行反复修模、试模, 导致的研制周期长、效率低的问题, 针对 3 种不同的拉伸成形工艺参数, 采用 AI-Form Stretch Forming (AISF) 有限元软件进行板料拉伸成形模拟, 探究了最佳拉伸成形工艺参数组合, 预测了板料在拉伸成形过程中的应变分布情况。研究发现: 当模具高度为 1000 mm 以及增大上模压力至 100 kN 时, 拉伸成形的板料表面变形均匀, 最大应变约为 0.15, 最大贴模间隙小于 1 mm。通过工艺试验验证发现, 试验与模拟结果较为吻合, 最大误差小于 2.8%, 且能够有效地降低板料拉伸成形过程中的起皱。结果表明, 最佳拉伸成形加载参数下能够获得质量较高的蒙皮零件, 降低研制周期, 提高生产效率。

关键词: 大尺寸蒙皮; 拉伸成形; 2A97 铝锂合金; 模具高度; 上模压力; 应变

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.01.013

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 01-0102-06

Numerical simulation and process optimization on longitudinal stretch forming of complex large size skin

Zhang Haibao, Han Yanbin, Du Zhihao, Zhu Hongbin

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

Abstract: In order to solve the problem of long development cycle and low efficiency caused by repeated repair and testing of die when using traditional empirical method in the stretch forming process of large-size double-curvature skin, for three different stretch forming process parameters, the AI-Form Stretch Forming (AISF) finite element software was used to simulate the sheet metal stretch forming, and the optimal combination of stretch forming parameters was explored to predict the strain distribution condition of sheet metal during the stretch forming process. The results show that when the die height is 1000 mm and the upper die pressure is increased to 100 kN, the surface deformation of the stretch-formed sheet metal is uniform with the maximum strain of 0.15 and the maximum die clearance less than 1 mm. Through process testing verification, the experimental result is in good agreement with the simulation result with the maximum error of less than 2.8%, which effectively reduces the wrinkling during sheet metal stretch forming process. Thus, the results show that high-quality skin parts are obtained at the optimum stretching loading parameters, reducing the development cycle and improving the production efficiency.

Key words: large size skin; stretch forming; 2A97 aluminum lithium alloy; die height; upper die pressure; strain

对于大尺寸蒙皮件, 拉伸成形技术是制造蒙皮件的主要工艺^[1]。拉伸成形工艺较为简单、工艺稳定性好、成形效率高, 得到了广泛应用。拉伸成形时使用数控蒙皮拉伸机钳口夹持板料的两个端部, 在钳口上施加拉伸力和弯曲力矩 (M), 对板料先进行预拉伸, 使得板料弯曲贴合模具 (图 1b)。为了使得拉伸成形后的板料应力分布更加均匀, 进一步减少板料预拉伸后的回弹, 对板料继续施加补拉 (图 1c)。可见, 拉伸成形过程中的拉伸力 (F_1 、

F_2 、 F_3)、拉伸成形轨迹和拉伸成形运动量等工艺参数影响着蒙皮的成形质量。

针对飞机蒙皮件, 国内外学者研究了工艺参数对蒙皮件成形质量的影响。Ueda M 等^[2]针对拉伸成形过程中板料的加载量和回弹之间的关系进行了系列研究, 试验结果表明, 在相同条件下进行补拉比进行预拉伸更有利于降低回弹。Oding S S 等^[3]研究了分层板料的飞机蒙皮拉伸成形, 结果表明, 在实际生产制造中, 采取分层设置能够使得板料更易贴合模具。EI-Domiaty A 等^[4]使用幂指型硬化材料模型, 针对板料在拉伸成形过程中的回弹, 进行了一系列研究。韩志仁等^[5-6]利用数值模拟, 对飞机蒙皮拉伸成形过程中夹钳的加载路径进行了优化研究,

收稿日期: 2024-05-29; 修订日期: 2024-09-01

作者简介: 张海宝 (1977-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: niatzhh@126.com

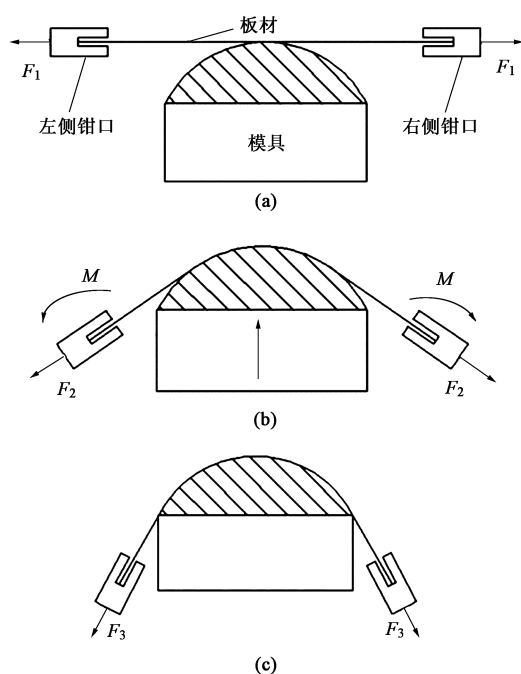


图 1 拉伸成形工艺示意图

(a) 初始状态 (b) 拉伸成形 (c) 补拉成形

Fig. 1 Schematic diagrams of stretch forming process

(a) Original state (b) Stretch forming

(c) Supplementary stretch forming

优化后的最大等效塑性应变减小为 0.035, 并且蒙皮的应变分布更加均匀, 减小了回弹, 获得较佳的板料成形质量。He D H 等^[7]提出了一种钛合金飞机蒙皮冷拉伸成形的优化方法。在优化模型中, 采用应力差的数学公式代替隐式回弹分析, 作为回弹程度指标, 此外, 采用多目标遗传算法 (Multi-objective Genetic Algorithm, MGA) 来寻找最佳加载条件。研究结果表明, 蒙皮零件最终回弹量为 0.5 mm, 获得了精度较高的蒙皮件。He D H 等^[8]研究了一种多步拉伸成形工艺, 通过有限元模拟和应变测量, 证实了该工艺可以减少变形缺陷的发生。Yang Z 等^[9]为三维钣金件的拉伸成形工艺设计了 4 种不同的加载轨迹, 数值计算结果表明, 采用最佳加载轨迹成形的球形零件的平均应变可降低 26%。此外, 增加离散加载点的数量, 可以使得钣金件变形分布更加均匀。Shim D 等^[10]根据应变分布设计了 5 种拉伸成形条件, 以确定最佳拉伸成形条件, 研究发现, 随着拉伸成形力的增大, 蒙皮的回弹降低, 但是硬度提高。Hardt D 等^[11]研究了不同工艺参数 (力、应变控制等) 对 2024 铝合金蒙皮回弹的影响, 研究发现, 应变控制模式比力控制模式更能准确地控制回弹。目前, 拉伸成形工艺是大尺寸蒙皮成形制造的重要方法。

此外, 学者们运用有限元模拟手段, 对拉伸成

形工艺参数进行了一系列优化研究, 提高了生产效率。Guo X N 等^[12]通过有限元模拟研究了 6061-T6 铝合金板拉伸成形后的回弹特性, 并通过试验验证了有限元模型的准确性。对参数的进一步研究表明, 回弹率随着屈服强度和板料半径的增大而增大, 但随着扣板弹性模量、扣板厚度和扣板开口面积比的增大而减小。张彦敏等^[13]将优化算法与数值模拟相结合, 确定了 2B06 铝合金蒙皮的最佳拉伸加载轨迹, 该拉伸轨迹不仅可以提高应变均匀性, 且回弹降低了 21.87%。Boogaard A H 等^[14]研究了拉伸成形过程中的大变形问题, 将材料的 Vegter 屈服准则分别拟合代入至 Nadai、Swift、Voce 这 3 种应变硬化曲线中, 并且使用数值模拟方法进行了比较验证。

然而在拉伸成形过程中, 较大的拉伸力可以降低回弹, 但也会导致厚度过度减薄, 产生滑移线、桔皮, 甚至拉裂; 同时, 采用试验的方法获取最佳工艺参数, 增加了制造与时间成本。因此, 本研究采用数值模拟的方法, 探究最佳拉伸成形工艺参数组合, 预测板料在拉伸成形过程中应变的分布情况, 抑制板料成形缺陷的产生。

1 工艺关键信息

1.1 试验件及材料性能

试验件与模具数模如图 2 所示, 该零件为双曲率零件, 零件一端为等曲率半径圆弧曲线, 半径为 1025 mm, 零件另一端曲率半径较大, 为近似直线的曲线。零件的整体长度约为 3500 mm, 零件圆弧端曲线长度约为 1600 mm, 直线端曲线长度约为 1800 mm, 原始厚度为 1.5 mm。2A97 铝锂合金具有耐损伤、高比强度、高比模量和良好的耐蚀性等特点, 密度比一般铝合金低 5%~8%, 因此, 在满足型号相关设计要求的前提下, 其被用来替代相应的铝合金材料, 可以显著减轻结构质量。零件使用 2A97-T3 铝锂合金材料拉伸成形。由于零件向上翘起, 为了更好地进行拉伸, 将模具向两端进行延伸, 构造向下弯曲的圆弧段, 由于延伸了模具, 因此选用零件的毛料尺寸为 6000 mm×2000 mm×1.5 mm。

本次仿真过程中采用 2A97-T3 铝锂合金材料, 为了使仿真结果更加准确, 需要对该材料的成形性能进行研究以获得材料的性能曲线。对该材料进行单向拉伸试验, 获得材料的工程应力-工程应变曲线。根据工程应力-工程应变曲线, 通过计算材料弹性变形阶段的斜率, 可得 2A97-T3 铝锂合

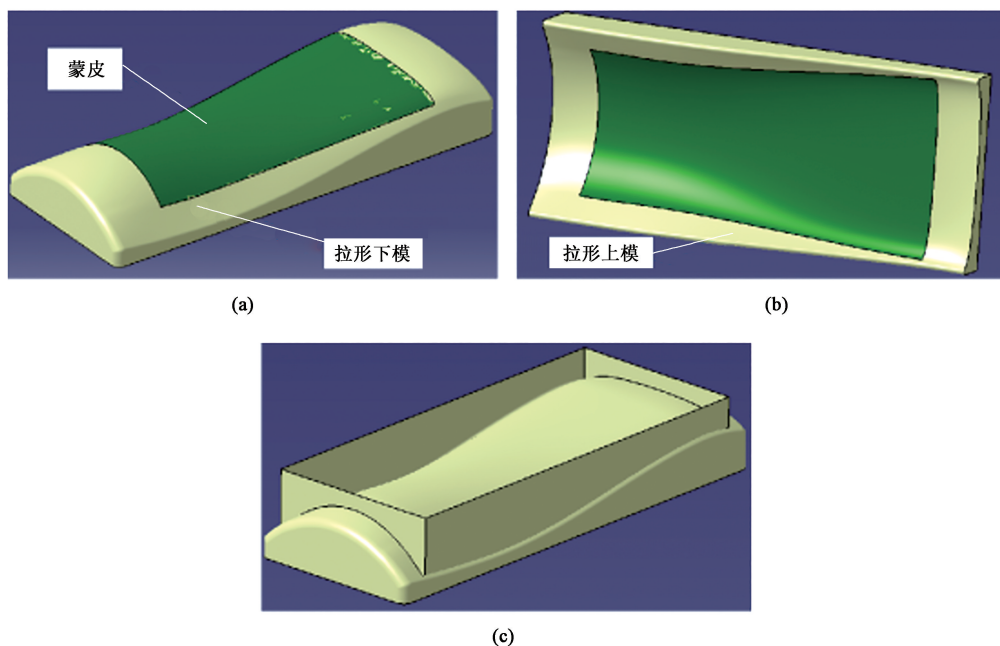


图 2 试验件与模具的数模

(a) 试验件与拉伸成形下模 (b) 试验件与拉伸成形上模 (c) 模具合模图

Fig. 2 Numerical models of test part and die

(a) Test part and stretch forming lower die (b) Test part and stretch forming upper die (c) Die assembly drawing

金的弹性模量 E 为 77 GPa, 屈服强度为 346 MPa。对于 T3 状态的 2A97 铝锂合金薄板进行泊松比测量, 5 个试样的结果分别为 0.32、0.29、0.35、0.37 和 0.41, 平均泊松比值为 0.348。通过多批次薄板的密度检测得到, 2A97-T3 铝锂合金薄板的密度为 $2660 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

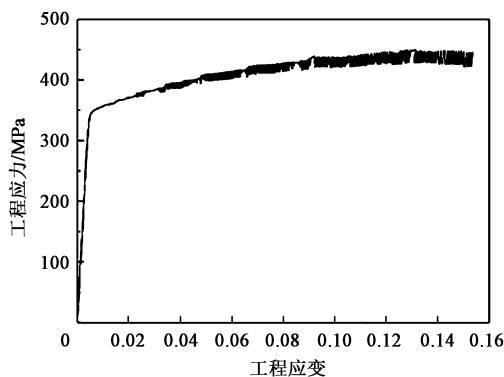


图 3 2A97-T3 铝锂合金的工程应力-工程应变曲线

Fig. 3 Engineering stress-engineering strain curve of 2A97-T3 aluminum lithium alloy

1.2 试验件制造难点

大尺寸双曲率蒙皮的制造难点为: (1) 大尺寸双曲率蒙皮在拉伸成形后, 零件表面出现滑移线, 表面修复工作量大, 影响零件表面质量; (2) 大尺寸双曲率蒙皮在拉伸成形中, 由于材料的弹性应变

不能完全转变为塑性应变, 往往产生较大回弹, 影响成形精度。

1.3 成形装备

本研究中使用 Cyril-Bath VTL 型数控拉伸成形机, 如图 4a 所示。该设备呈左右对称结构, 单侧各有一个 U 形臂, 由前后两个滑块架于导轨上, U 形臂上有一个主轴可以完成伸缩旋转运动。夹钳与主轴相联, 夹钳由 7 个直钳口夹钳组成, 如图 4b 的 0~6 所示, 夹钳之间可以形成一定角度, 夹钳间使用转动副连接, 使用连杆机构驱动, 如图 4b 所示。另外, 该拉伸成形机模具摆放平台可以沿竖直方向垂直运动, 并能绕滑块移动方向的轴转动, 使模具与水平面成一定角度。

2 拉伸成形工艺有限元仿真

本研究采用 AI-Form Stretch Forming (AISF) 有限元模拟软件, 进行专业的蒙皮拉伸成形工艺模拟, 该软件能够较好地考虑蒙皮材料的大变形和位移, 能够较为真实地反应材料力学行为。为探究不同工艺参数对材料变形和回弹的影响, 使用 AISF 软件进行仿真模拟预测, 为蒙皮的实际生产提供理论依据。

2.1 拉伸成形工艺参数 1

拉伸成形工艺参数 1 和曲钳口角度分别如表 1

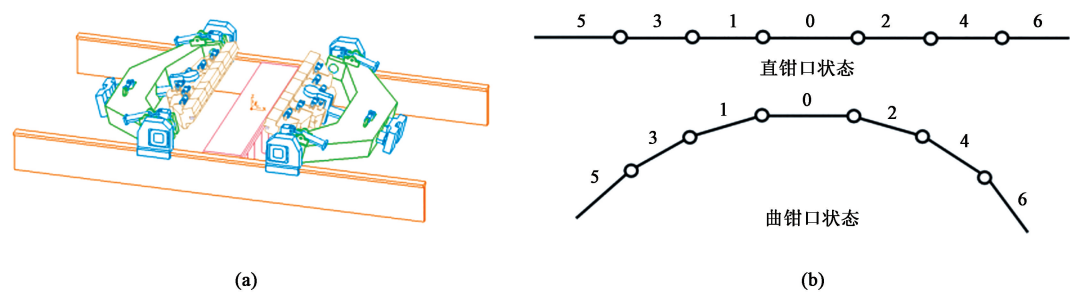


图 4 Cyril-Bath VTL 型数控拉伸成形机 (a) 和夹钳组成 (b)

Fig. 4 Cyril-Bath VTL type CNC stretch forming machine (a) and composition of clamps (b)

和表 2 所示，按照参数进行有限元仿真。拉伸成形机进行加载时，夹钳最终位置与模具位置如图 5 所示。最终应变与回弹模拟结果如图 6 所示。根据拉伸成形模拟应变分布云图可以看出（图 6a），在钳口线与毛料边缘交点处，材料发生了局部大变形，最大应变接近 1.25，在实际拉伸成形过程中可能在这些位置发生破裂失效，为防止板料在拉伸成形过程中产生破裂缺陷，需要调整模具高度。由回弹结果可以看出（图 6b），在中部下凹区域内有起皱，贴模间隙达到了 16.55 mm，因此需要增加拉伸量与上模压力，减少该部分的起皱。

表 1 拉伸成形工艺参数 1

Table 1 Stretch forming process parameter 1

参数	模具高度/ mm	模具倾角/ (°)	上模压力/ kN	拉伸量/ %	直线端 包覆角/ (°)	圆弧端 包覆角/ (°)
数值	700	0	50	3	15	12

表 2 拉伸成形工艺参数 1 下的曲钳口角度

Table 2 Curved clamp angles under stretch forming process parameter 1

钳口	6-4	4-2	2-0	0-1	1-3	3-5
直线端/(°)	16	20	20	20	20	16
圆弧端/(°)	16	21	21	21	21	16

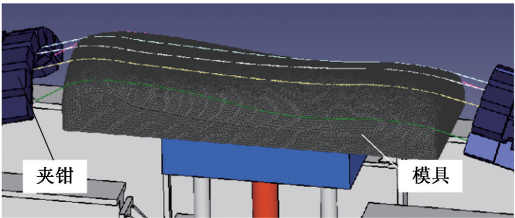


图 5 拉伸成形工艺参数 1 下的夹钳与模具相对位置

Fig. 5 Relative position of clamp and die under stretch forming process parameter 1

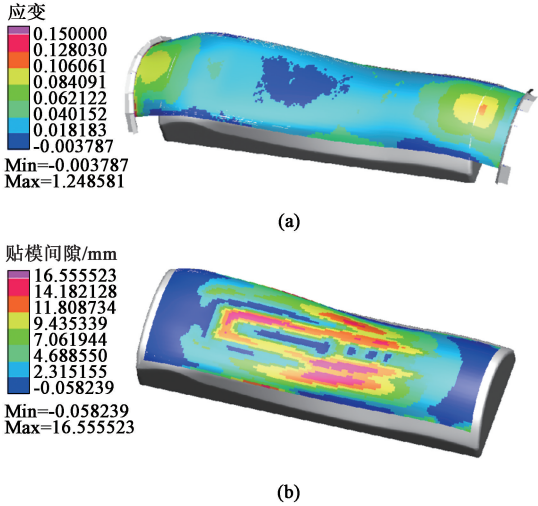


图 6 拉伸成形工艺参数 1 下的拉伸成形结果

(a) 应变 (b) 贴模间隙

Fig. 6 Result of stretch forming under stretch forming process parameter 1

(a) Strain (b) Die gap

2.2 拉伸成形工艺参数 2

为解决拉伸成形工艺参数 1 下蒙皮易产生局部大变形、破裂且回弹较大的问题，对模具高度、上模压力、包覆角和钳口角度进行调整，拉伸成形工艺参数 2 和曲钳口角度分别如表 3 和表 4 所示，拉伸成形机进行加载时，夹钳最终位置与模具位置如图 7 所示。按照参数进行有限元仿真，最终应变与回弹模拟结果如图 8 所示。根据拉伸成形应变模拟结果可以看出（图 8a），使用拉伸成形工艺参数 2，蒙皮成形区域无局部大变形，在钳口夹持的板料 4 个边角处产生较大应变，应变值为 0.347362，相比于拉伸成形工艺参数 1 下的拉伸成形结果，最大应变降低了 72.8%，但是拉伸使得板料中间部分产生起皱。对拉伸成形结果进行回弹模拟可知（图 8b），沿着板料长度方向的侧边产生较大回弹，与模具间隙达 6.19 mm。板料中间区域的起皱更加明显，贴模间隙达到了 51 mm。因此，应该继续增加上模压力，且继续对包覆角和曲钳口角度进行优化。

表 3 拉伸成形工艺参数 2

Table 3 Stretch forming process parameter 2

参数	模具高度/ mm	模具倾角/ (°)	上模压力/ kN	拉伸量/ %	直线端包覆角/ (°)	圆弧端包覆角/ (°)
数值	600	0	70	3	18	15

表 4 拉伸成形工艺参数 2 下的曲钳口角度

Table 4 Curved clamp angles under stretch forming process parameter 2

钳口	6-4	4-2	2-0	0-1	1-3	3-5
直线端/(°)	5	5	5	5	5	5
圆弧端/(°)	16	21	21	21	21	16

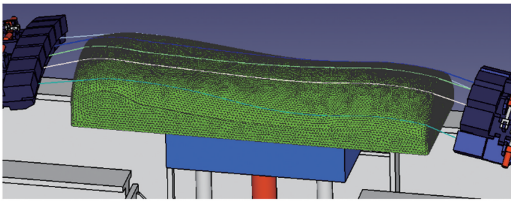


图 7 拉伸成形工艺参数 2 下的夹钳与模具相对位置
Fig. 7 Relative position of clamp and die under stretch forming process parameter 2

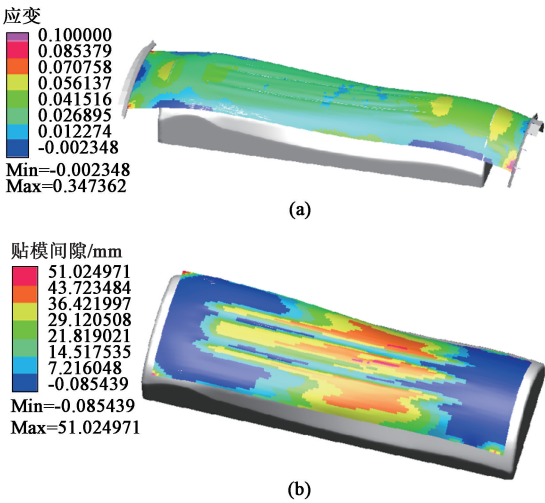


图 8 拉伸成形工艺参数 2 下的拉伸成形结果
(a) 应变 (b) 贴模间隙

Fig. 8 Result of stretch forming under stretch forming process parameter 2
(a) Strain (b) Die gap

2.3 拉伸成形工艺参数 3

为继续降低蒙皮拉伸成形后的应变值,并降低回弹,再次对模具高度和钳口角度进行优化,拉伸成形工艺参数 3 和曲钳口角度分别如表 5 和表 6 所示,拉伸成形机进行加载时,夹钳最终位置与模具

表 5 拉伸成形工艺参数 3

Table 5 Stretch forming process parameter 3

参数	模具高度/ mm	模具倾角/ (°)	上模压力/ kN	拉伸量/ %	直线端包覆角/ (°)	圆弧端包覆角/ (°)
数值	1000	0	100	3	15	16

表 6 拉伸成形工艺参数 3 下的曲钳口角度

Table 6 Curved clamp angles under stretch forming process parameter 3

钳口	6-4	4-2	2-0	0-1	1-3	3-5
直线端/(°)	0	5	5	5	5	0
圆弧端/(°)	0	15	15	15	15	0

位置如图 9 所示。按照参数进行有限元仿真,最终应变与回弹模拟结果如图 10 所示。根据拉伸成形模拟结果可以看出(图 10a),使用拉伸成形工艺参数 3,蒙皮成形区域无局部大变形,整个坯料内部的变形量均匀,最大应变降低为 0.159696,相比于拉伸成形工艺参数 1 下的拉伸成形结果,最大应变降低了 88%。对拉伸成形结果进行回弹模拟(图 10b),沿着板料长度方向的侧边,成形区域内的贴模间隙已小于 2.5 mm。该组参数下的拉伸结果良好,局部应变和回弹值均较小,可选用该组加载参数设计拉伸成形轨迹。

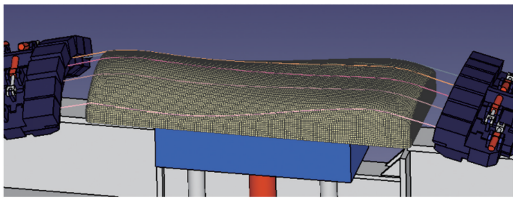


图 9 拉伸成形工艺参数 3 下的夹钳与模具相对位置
Fig. 9 Relative position of clamp and die under stretch forming process parameter 3

3 工艺试验结果

基于上述仿真结果以及拉伸成形工艺参数 3,进行了工艺试验验证。在成形后的蒙皮上沿着长度方向与宽度方向的路径选择一系列特殊节点(图 10b),测量贴模间隙,如表 7 所示,试验与模拟结果较为吻合,最大误差<2.8%。最终通过人工校形后,再次测量贴模间隙,发现板料与模具的距离均在 1 mm 以下(表 8)。

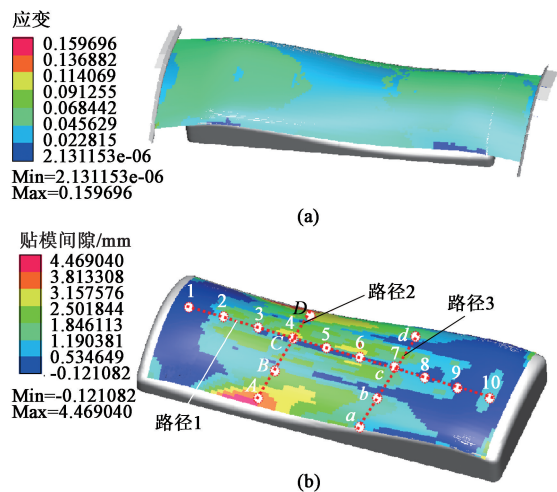


图 10 拉伸成形工艺参数 3 下的拉伸成形结果
(a) 应变 (b) 贴模间隙

Fig. 10 Results of stretch forming under stretch forming process parameter 3
(a) Strain (b) Die gap

表 7 验证试验的贴模间隙 (mm)

Table 7 Die gaps in verification test (mm)

路径 1	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6	点 7	点 8	点 9	点 10
贴模间隙	0.31	1.02	0.67	0.15	0.21	1.05	0.79	0.46	0.37	0.68
路径 2	点 A	点 B	点 C	点 D						
贴模间隙	4.11	2.32	0.15	2.97						
路径 3	点 a	点 b	点 c	点 d						
贴模间隙	0.87	1.56	0.79	1.91						

表 8 校形后的贴模间隙 (mm)

Table 8 Die gaps after calibration (mm)

路径 1	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6	点 7	点 8	点 9	点 10
贴模间隙	0.26	0.82	0.54	0.12	0.19	0.65	0.86	0.56	0.37	0.68
路径 2	点 A	点 B	点 C	点 D						
贴模间隙	0.88	0.32	0.15	0.78						
路径 3	点 a	点 b	点 c	点 d						
贴模间隙	0.77	0.52	0.75	—						

4 结论

(1) 考虑 Cyril-Bath VTL 型数控拉伸成形机的真实机构运动, 建立了运动仿真模型, 进而建立了拉伸成形过程的全流程仿真模型, 实现了拉伸成形应变以及拉伸成形回弹的仿真预测。

(2) 使用有限元技术对拉伸成形过程进行数值模拟, 预测可能出现的成形缺陷, 评估零件成形的可行性, 获得了最大应变约为 0.15、局部最大贴模间隙小于 1 mm 的蒙皮零件。

参考文献:

[1] 熊杰, 范林林, 龚永福, 等. 进气道复杂蒙皮零件数字化制造

技术研究 [J]. 洪都科技, 2008 (1): 17-23.

Xiong J, Fan L L, Gong Y F, et al. Development on digitization technique for manufacture of complicated skin parts of air intake [J]. Hongdu Science and Technology, 2008 (1): 17-23.

[2] Ueda M, Ueno K, Kobayashi M. A study of springback in the stretch bending of channels [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1981, 5 (3-4): 163-179.

[3] Oding S S, Alimenko I A. Stretch-wrap forming of multilayer skins [J]. Soviet Aeronautics (English Translation of VUZ, Aviatsionnaya Tekhnika), 1986, 29: 119-123.

[4] EI-Domiaty A, Shabaik A H. Bending of work-hardening metals under the influence of axial load [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1984, 10 (1): 57-66.

[5] 韩志仁, 孔庆猛, 孟祥韬, 等. 飞机蒙皮拉形加载轨迹研究 [J]. 机械设计与制造, 2016 (4): 258-261.

Han Z R, Kong Q M, Meng X T, et al. Study on loading trajectory of aircraft skin in stretch forming [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016 (4): 258-261.

[6] 韩志仁, 周叔阳, 刘宝明, 等. 基于 ANSYS 的蒙皮拉形钳口轨迹优化技术研究 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2017, 34 (1): 15-19.

Han Z R, Zhou S Y, Liu B M, et al. Research on loading trajectory optimization technology in stretch forming for aircraft skin based on ANSYS [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2017, 34 (1): 15-19.

[7] He D H, Li D S, Li X Q, et al. Optimization on springback reduction in cold stretch forming of titanium-alloy aircraft skin [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20 (12): 2350-2357.

[8] He D H, Li X Q, Li D S, et al. Process design for multi-stage stretch forming of aluminium alloy aircraft skin [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20 (6): 1053-1058.

[9] Yang Z, Cai Z Y, Che C J, et al. Numerical simulation research on the loading trajectory in stretch forming process based on distributed displacement loading [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82: 1353-1362.

[10] Shim D, Baek G, Shin G, et al. Investigation of tension force in stretch forming of doubly curved aluminum alloy (Al5083) sheet [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17 (4): 433-444.

[11] Hardt D, Norfleet W A, Valentin V M, et al. In process control of strain in a stretch forming process [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2001, 123 (4): 496-503.

[12] Guo X N, Xu H, Zeng Q, et al. Springback characteristics of arched aluminum alloy gusset plate after stamping forming [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 159: 107294.

[13] 张彦敏, 周贤宾. 飞机蒙皮拉伸成形工艺参数优化 [J]. 航空学报, 2006, 27 (6): 1203-1208.

Zhang Y M, Zhou X B. Parameter optimization in aircraft skin stretch forming process [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27 (6): 1203-1208.

[14] Boogaard A H, Wisselink H H, Huétink J. Advanced material models contribute to accuracy in industrial sheet forming simulations [J]. Advanced Materials Research, 2005, 522 (6-8): 71-80.