

特种成形

## 7075 铝合金变截面曲率构件拉弯仿真及试验研究

金妍<sup>1</sup>, 杜建宁<sup>1</sup>, 崔丽<sup>1</sup>, 郭贵强<sup>2</sup>, 王逸涵<sup>2</sup>, 李小强<sup>2</sup>, 李东升<sup>2</sup>

(1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034; 2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**摘要:** 针对某型飞机 7075 铝合金变截面曲率构件拉弯成形起皱明显、回弹严重、手工敲修量大、工艺周期长等问题, 提出采用新淬火状态型材一次拉弯成形工艺方法, 并将有限元仿真与工艺试验相结合, 分析验证了拉伸力、坯料宽度、包覆角度等工艺参数对零件起皱、破裂、回弹的影响规律。结果表明: 增大拉伸力可有效抑制型材内侧的起皱现象; 合理减小坯料宽度可减小型材破裂的风险; 增大包覆角度可减小零件的回弹量。最终, 获得了优化的拉弯成形工艺参数, 即拉伸力为 42 kN、坯料初始宽度为 130 mm、包覆角度为 96°, 利用该参数组合进行拉弯成形, 零件未发生破裂, 有效避免了内侧起皱现象, 减小了零件的回弹量。

**关键词:** 7075 铝合金; 变截面曲率构件; 拉弯成形; 拉伸力; 回弹

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.015

**中图分类号:** TG306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0096-07

## Simulation and experiment research on stretch bending of 7075 aluminum alloy curvature component with variable cross-section

Jin Yan<sup>1</sup>, Du Jianing<sup>1</sup>, Cui Li<sup>1</sup>, Guo Guiqiang<sup>2</sup>, Wang Yihan<sup>2</sup>, Li Xiaoqiang<sup>2</sup>, Li Dongsheng<sup>2</sup>

(1. AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** For the problems of obvious wrinkling, serious springback, large amount of manual knocking and repairing, and long process cycle in stretch bending of 7075 aluminum alloy curvature component with variable cross-section for a certain aircraft, a one-step stretch bending process method of the newly quenched profile was proposed, and through the combination of finite element simulation and process test, the influences laws of process parameters such as stretch force, profile width and wrapping angle on wrinkling, rupture and springback of part were analyzed and verified. The results show that increasing the tensile force can effectively inhibit wrinkling phenomenon inside the profile, reasonably reducing the profile width can reduce the risk of profile rupture, and increasing the wrapping angle can reduce the springback of part. The optimized stretch bending process parameters were obtained with the stretch force of 42 kN, initial profile width of 130 mm and the wrapping angle of 96°. Using this combination of parameters for stretch bending, the rupture of part does not occur, the wrinkling phenomenon inside the profile is effectively avoided, and the springback of part is reduced.

**Key words:** 7075 aluminum alloy; curvature component with variable cross-section; stretch bending; stretch force; springback

铝合金具有高比强度、良好的延展性和耐腐蚀性等优异性能, 在航空航天领域的应用十分广泛<sup>[1-2]</sup>。其中, 7075 铝合金作为一种可热处理强化的高强变形铝合金, 在退火或新淬火状态下具有良好的室温成形性能, 常被用于航空结构件制造<sup>[3-4]</sup>。

飞机机体主要由带有曲面外形的蒙皮和框梁骨架组成, 曲率构件是骨架结构的重要形式, 其成形质量直接影响飞机的装配精度和整体气动外形, 是影响飞机服役性能、制造周期和成本的重要因素<sup>[5]</sup>。然而, 该类零件的外形细长、轮廓尺寸大、截面尺寸小、壁厚薄, 精确成形难度极大。并且, 为了满足飞机气动外形的需求, 一些曲率构件被设计为具有变截面特征, 更加增大了其成形难度。

型材拉弯工艺因具有回弹小、零件贴模度好的特点而成为大型曲率构件的主要成形方法<sup>[6-7]</sup>。型材拉弯成形中可能出现破裂、起皱及回弹等多种成形缺陷, 这些缺陷与工艺参数的选取密切相关<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2021-02-08; 修订日期: 2021-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52105317)

作者简介: 金妍 (1978-), 女, 学士, 高级工程师

E-mail: 584496540@qq.com

通信作者: 郭贵强 (1988-), 男, 博士, 中级职称

E-mail: guoguiqiang@buaa.edu.cn

单纯地依靠试验研究和理论解析方法，难以准确、高效地制定拉弯工艺参数。应用有限元软件模拟拉弯成形过程，能够比较准确地预测型材的变形趋势及可能发生的成形缺陷，在回弹量的计算上同样具有一定的精度。因此，越来越多的研究者借助有限元方法，对拉弯工艺过程进行分析，并优化工艺参数。金朝海等<sup>[9]</sup>利用数值模拟技术分析了 AA6082 矩形截面铝型材绕弯成形中预拉伸和补拉伸对回弹量减少的影响规律，发现影响回弹的主要因素为材料的应变硬化性能、预拉伸量、补拉伸量以及拉伸顺序。Nanu N 等<sup>[10]</sup>建立了回弹参数预测模型，以预测沿板厚方向分布的回弹函数，并根据弯曲和拉伸力引起的应变来确定薄板中的应力。卜晓珍等<sup>[11]</sup>利用 ABAQUS 对 7075-T6 铝合金  $\pi$  形截面型材进行拉弯工艺仿真，结果表明，回弹量随着预拉量、补拉量的增大有明显减小的趋势，而回弹量与弯曲半径和摩擦因数均呈正相关。

因此，本文针对某 7075 铝合金变截面曲率构件，采用新淬火状态板弯型材一次拉弯成形，通过有限元仿真与工艺试验相结合，分析并验证了拉伸力、坯料宽度、包覆角度等对零件起皱、破裂、回弹的影响规律，获得了优化工艺参数，成形出合格的零件，从而减少了人工敲修量，提高了产品质量与生产效率。

### 1 零件特征及工艺分析

本文所研究的零件为某型飞机 7075 铝合金变截面变曲率加强缘条，如图 1 所示。该零件的外形细长、轮廓尺寸大，总弧长  $L$  约为 4655 mm，左右跨度约为 2290 mm，上下跨度约为 1800 mm，包覆角度约为  $188^\circ$ 。截面大体为  $L$  形，夹角沿弧长变化，最大夹角约为  $144.5^\circ$ ，位于零件对称中心面，最小夹角约为  $102.3^\circ$ ，位于零件两端面。最大边宽为 55 mm，零件的厚度为 1.8 mm。零件最终需人工时效至 T6 态。

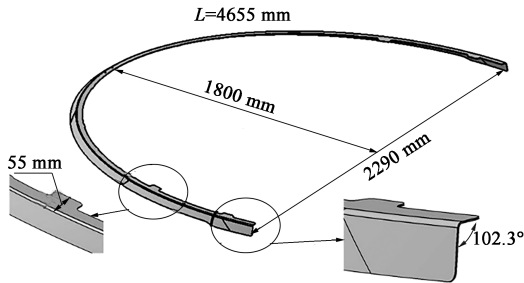


图1 零件几何形状及尺寸  
Fig. 1 Geometry shape and sizes of part

目前，该零件采用二次拉弯工艺成形，即对退火状态下的板弯型材进行拉弯预成形（第 1 道次拉弯成形），经固溶热处理后，在新淬火状态下进行拉弯终成形（第 2 道次拉弯成形）。预成形后，零件内侧起皱明显，需进行大量的人工敲修；淬火后，零件翘曲变形严重，导致第 2 道次拉弯初始装卡十分困难；终成形后，零件回弹严重，仍需进行手工校形。大量手工敲修不仅严重影响零件的疲劳性能、抗冲击性能、抗应力腐蚀性能等，而且工艺周期长、生产效率低，严重制约了型号批产。因此，提出采用对新淬火状态板弯型材直接进行一次拉弯成形的工艺方法，避免因淬火产生的翘曲变形，并通过工艺优化，获得合适的工艺参数，消除零件内侧的起皱现象，有效减小回弹量。

### 2 材料成形性能试验

试验所用初始材料为厚度为 1.8 mm 退火态（O 态）7075 铝合金板材，其化学成分如表 1 所示。根据 GB/T 228.1—2010<sup>[12]</sup>，采用线切割沿板料轧制方向制取单向拉伸试样，试样的形状及尺寸如图 2 所示。在空气炉中对试样进行固溶热处理（温度为  $465^\circ\text{C}$ ，保温时间为 40 min），之后在冷水中淬火，转移时间小于 5 s。将固溶热处理（W 态）的试样置于  $-18^\circ\text{C}$  环境中保存备用。

表1 7075 铝合金化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of 7075 aluminum alloy  
(%, mass fraction)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28
Zn	Ti	其他		Al	
		单个	合计		
5.1~6.1	0.20	0.05	0.15	余量	

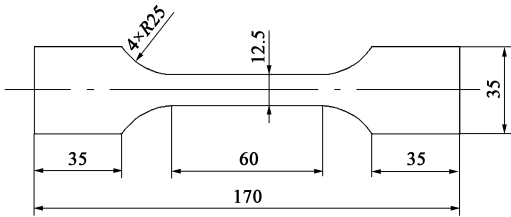


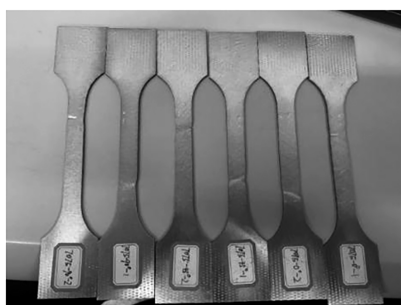
图2 单向拉伸试样形状及尺寸  
Fig. 2 Shape and sizes of uniaxial tensile specimen

在电子万能材料试验机上进行单向拉伸试验，如图 3a 所示。该试验机最大载荷为 100 kN，载荷

控制精度为 $\pm 0.5\%$ ，位移控制精度为 $\pm 0.5\%$ ，速度范围为 $0.001 \sim 500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。试验所用引伸计的标距长度为 $50 \text{ mm}$ ，量程为 $5 \text{ mm}$ 。试验拉伸速度为 $0.06 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，当变形量达到 $4.8 \text{ mm}$ 时摘除引伸计，之后将试样拉伸至断裂，试验后的试样如图 3b 所示。将试验获得的载荷-位移曲线转化为真实应力-真实应变曲线，结果如图 4 所示，用于拉弯有限元仿真建模。



(a)



(b)

图 3 单向拉伸试验设备 (a) 及试验后的试样 (b)

Fig. 3 Uniaxial tensile test equipment (a) and specimens after testing (b)

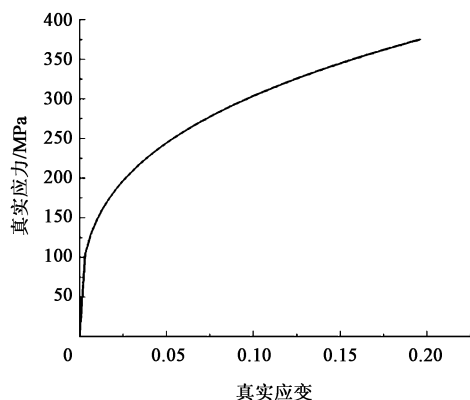


图 4 7075-W 铝合金的真实应力-真实应变曲线

Fig. 4 Curve of true stress-true strain for 7075-W aluminum alloy

### 3 拉弯有限元模型建立

根据零件特征分析结果，建立有限元仿真的几何模型。坯料长度需在零件最大弧长展开尺寸的基础上增加拉弯过程的夹持段长度和悬空段长度，坯料总长为 $5500 \text{ mm}$ ；坯料宽度在零件两个最大边宽之和的基础上增加适当工艺余量，坯料总宽度为 $140 \text{ mm}$ ；坯料厚度即为零件的厚度，为 $1.8 \text{ mm}$ 。将坯料制成板弯型材，型材长度为 $5500 \text{ mm}$ ，两边宽度分别为 $60$ 和 $70 \text{ mm}$ ，圆角半径为 $5 \text{ mm}$ ，并以零件最小夹角 $102.3^\circ$ 作为型材截面夹角。

基于 ABAQUS 软件建立拉弯过程的有限元仿真模型，如图 5 所示。由于结构对称，采用半模型进行模拟仿真，以提高计算效率。型材为可变形体，采用减缩积分的四边形壳单元 (S4R)，模具和夹钳采用四边形离散刚体 (R3D4)，网格尺寸为 $5 \text{ mm}$ 。定义型材的材料模型，密度为 $2.8 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3}$ ，弹性模量为 $70 \text{ GPa}$ ，泊松比为 $0.33$ ，塑性性能参考图 4，且假设材料表现为等向强化，厚向采用高斯积分，共 $5$ 个积分点。拉弯过程采用动态显式算法 (Dynamic, Explicit) 进行计算，分为加载和拉弯两个分析步，加载分析步长为 $5 \text{ s}$ ，对型材逐渐施加载荷至预定值，拉弯分析步长为 $300 \text{ s}$ ，保持拉伸力不变，夹钳带动型材转动至预定包覆角度，质量放大系数为 $1 \times 10^5$ ；回弹过程采用静态隐式算法 (Static, General) 进行计算。拉弯过程中型材端部与夹钳采用 Tie 连接，型材与模具采用罚函数接触算法，摩擦因数为 $0.1$ 。

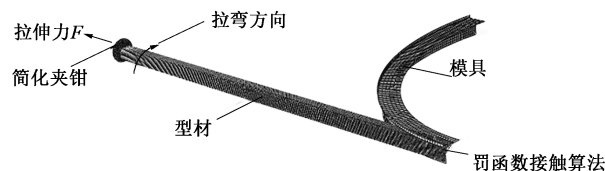


图 5 拉弯有限元仿真模型

Fig. 5 Finite element simulation model of stretch bending

### 4 拉弯工艺参数影响规律分析

#### 4.1 拉伸力对成形结果的影响规律

拉弯成形在型材弯曲的同时施加切向拉伸力，从而改变型材截面的应力、应变分布状态，避免型材内侧起皱。因此，拉伸力的合理选择对防止型材起皱十分关键。根据型材截面积和材料成形性能，

分别选择 35、42 和 50 kN 共 3 种拉伸力, 进行拉弯工艺仿真, 成形后型材的切向应变云图如图 6 所示。可以看出: 当拉伸力为 35 kN 时, 型材内侧的起皱现象明显; 当拉伸力增大至 42 kN 时, 起皱现象得到部分抑制; 拉伸力继续增大至 50 kN, 不再出现起皱现象。

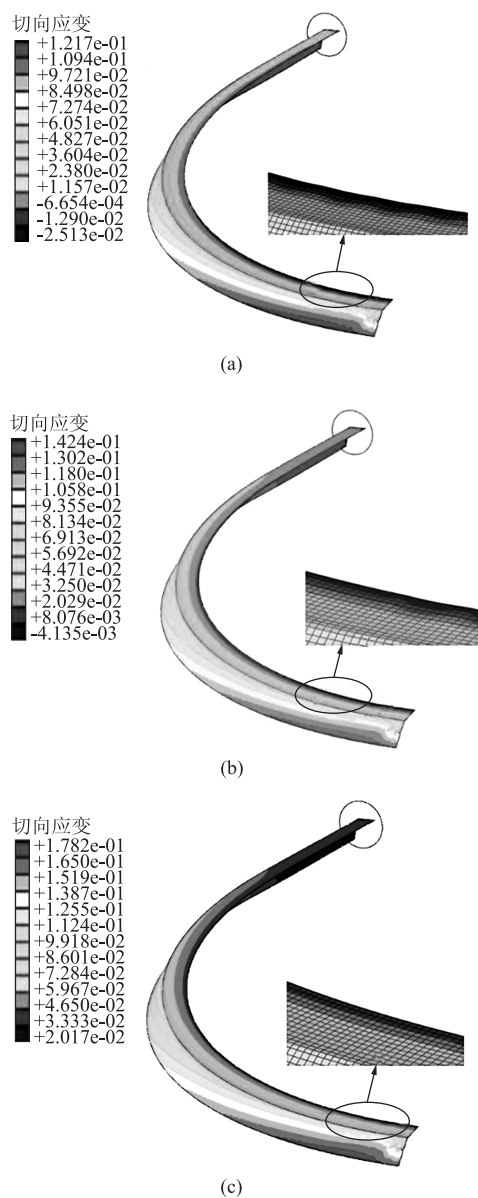


图 6 不同拉伸力下型材切向应变分布云图

(a) 35 kN (b) 42 kN (c) 50 kN

Fig. 6 Cloud diagrams of tangential strain distribution for profile with different tensile forces

图 7 为不同拉伸力下型材截面内、外侧切向应变沿轮廓的分布情况。可以看出: 随着拉伸力的增大, 型材截面内、外侧的拉应变均增大; 当拉伸力为 35 kN 时, 型材内侧存在大量压应变, 且应变沿轮廓呈锯齿状分布, 说明型材内侧的起皱趋势明显;

当拉伸力增大至 42 kN 时, 型材内侧压应变大部分转化为拉应变, 且应变沿轮廓分布不再呈现明显的锯齿状, 说明型材内侧的起皱趋势得到部分抑制; 当拉伸力继续增大至 50 kN 时, 型材截面全部为拉应变, 且应变沿轮廓分布的变化平缓, 此时已不再出现起皱现象。但是, 应变的增加将导致截面收缩和厚度减薄加剧, 对零件的成形质量有一定的负面影响, 可能出现颈缩甚至断裂等缺陷。当拉伸力为 50 kN 时, 型材的最大等效应变为 0.175, 最大等效应力为 371.8 MPa, 接近材料的抗拉强度。因此, 实际拉弯过程中型材极易发生断裂。

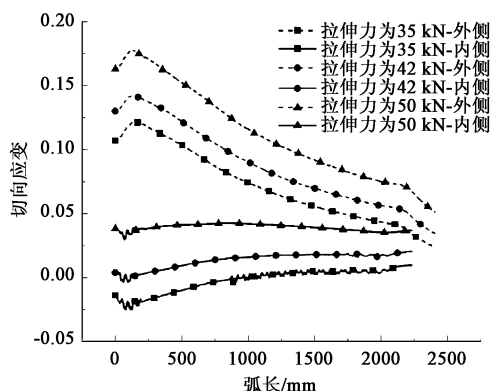


图 7 不同拉伸力下型材截面内、外侧切向应变沿轮廓分布

Fig. 7 Tangential strain distributions of inner and outer sides for profile section along contour with different tensile forces

#### 4.2 型材边宽对成形结果的影响规律

由以上分析可知, 增大拉伸力可有效避免型材内侧起皱现象, 但由于该零件截面高度大, 增大拉伸力极易增大型材外侧断裂的风险。考虑到最大等效应变及最大等效应力均出现在型材最外侧, 且零件翼板的最大边宽为 55 mm, 因此, 在保证工艺余量的前提下, 试图通过减小坯料宽度来同时避免起皱与破裂现象的发生。

将坯料初始宽度由 140 mm 减小至 130 mm, 型材两边宽度均设定为 60 mm, 拉伸力对应减小至 46 kN (与坯料初始宽度为 140 mm、拉伸力为 50 kN 对应的截面的平均应力相同), 进行拉弯工艺仿真, 成形后型材的等效应变、等效应力的分布情况如图 8 所示。可以看出, 最大等效应变为 0.167, 最大等效应力为 356.9 MPa, 与坯料初始宽度为 140 mm 时相比, 均明显减小。

在施加相同截面平均应力的条件下, 不同宽度的型材截面内、外侧切向应变沿轮廓的分布情况如图 9 所示。可以看出, 与坯料初始宽度为 140 mm

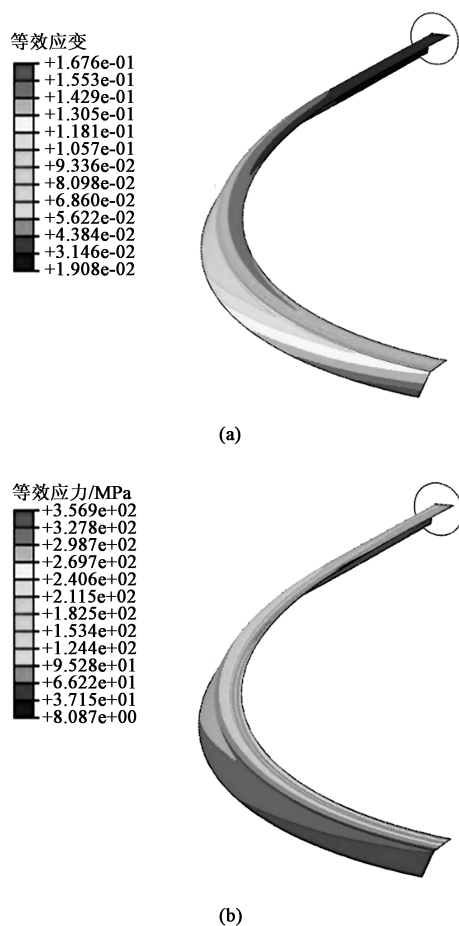


图 8 初始宽度为 130 mm 时型材的等效应变 (a) 和等效应力 (b) 分布云图

Fig. 8 Distribution cloud diagrams of equivalent strain (a) and equivalent stress (b) for profiles with initial width of 130 mm

时相比, 初始宽度为 130 mm 时对应的型材截面外侧的切向应变明显减小。因此, 通过减小坯料的初始宽度, 从而减小了型材截面的高度, 导致最大等效应力和最大等效应变减小, 能够降低型材的破裂风险。同时, 由于拉弯成形后的零件需具有一定的工艺余量, 以便后续进行数控加工, 因此, 坯料的初始宽度最小为 130 mm。

#### 4.3 包覆角度对零件成形精度的影响规律

卸载时, 型材内部的弹性变形得到释放, 零件发生回弹。由于该零件的轮廓尺寸大、截面尺寸小、刚度弱、回弹量大, 单纯依靠拉伸力的优化难以获得高精度的零件。在拉弯过程中对型材施加一定的包覆角度, 可有效提高零件的成形精度。因此, 分别使用包覆角  $94^\circ$  和  $96^\circ$  进行拉弯仿真, 研究包覆角度对零件成形精度的影响规律。拉伸力设置为 42 kN, 坯料初始宽度为 130 mm, 得到的回弹仿真结果如图 10 所示。

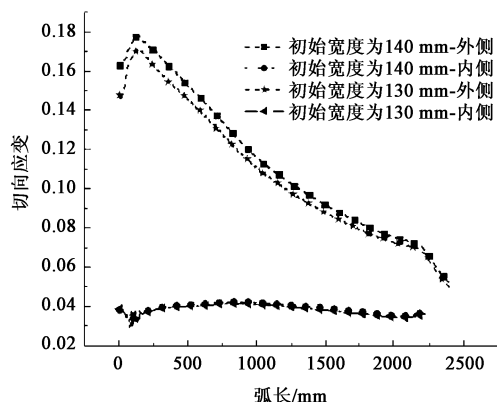


图 9 不同型材宽度条件下截面内、外侧切向应变沿轮廓分布  
Fig. 9 Tangential strain distributions of inner and outer sides for profile section along contour under different profile widths

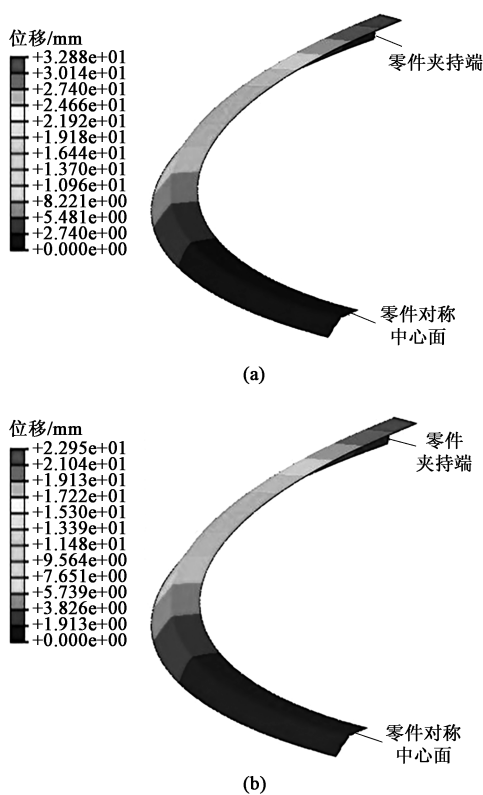


图 10 不同包覆角度拉弯回弹仿真结果

(a) 包覆角度为  $94^\circ$  (b) 包覆角度为  $96^\circ$

Fig. 10 Simulation results of springback in stretch bending with different wrapping angles

(a) Wrapping angle of  $94^\circ$  (b) Wrapping angle of  $96^\circ$

提取仿真结果中零件段部分最外侧节点的位移值, 用于评价零件的成形精度。不同包覆角度拉弯成形后, 回弹量沿零件的轮廓分布情况如图 11 所示。可以看出, 通过增加包覆角度, 可有效减小回弹量, 提高零件的成形精度。

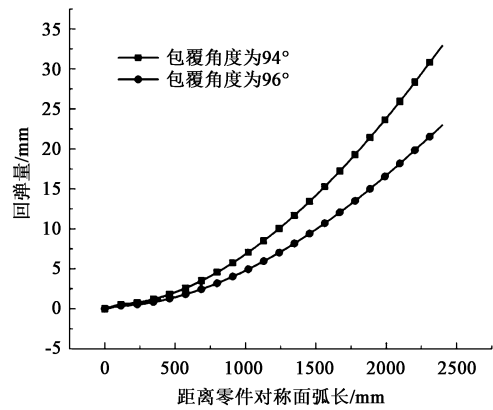


图 11 不同包覆角度条件下回弹量沿零件轮廓分布  
Fig. 11 Distributions of springback amounts along contour of part under different wrapping angles

5 工艺验证试验

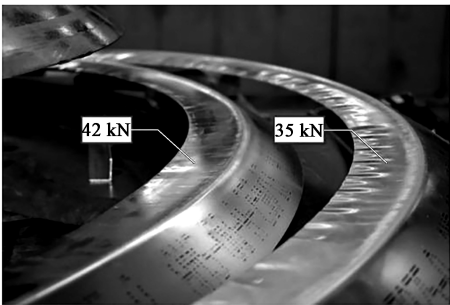
针对不同的工艺条件分别进行型材拉弯验证试验，具体试验条件如表 2 所示。不同拉伸力条件下的试验结果如图 12 所示：当拉伸力为 35 kN 时，型材内侧起皱现象十分明显；当拉伸力增大至 42 kN 时，起皱现象得到有效抑制；当拉伸力继续增大至 50 kN 时，拉弯过程中型材长度中点位置附近发生断裂。

表 2 拉弯试验条件  
Table 2 Conditions of stretch bending test

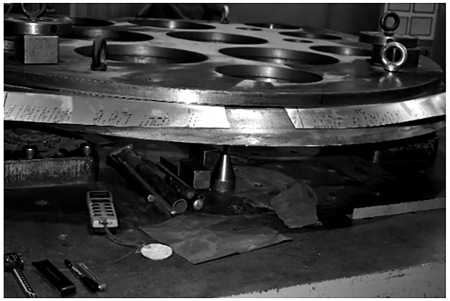
编号	拉伸力/kN	坯料初始宽度/mm	包覆角度/(°)
1	35	140	94
2	42	140	94
3	50	140	94
4	46	130	94
5	42	130	94
6	42	130	96

当坯料初始宽度从 140 mm 减小至 130 mm，型材内侧宽度保持 60 mm 不变，外侧宽度减少 10 mm，由 70 mm 减小至 60 mm，拉伸力对应减小至 46 kN。拉弯工艺的验证试验结果如图 13 所示，零件未发生断裂。

当坯料初始宽度为 130 mm，拉伸力设置为 42 kN，包覆角度分别设置为 94° 和 96°，进行型材拉弯工艺验证试验，试验结果如图 14 所示。将零件与检验模进行对比，从零件段部分两端面开始，每



(a)



(b)

图 12 不同拉伸力下的型材拉弯试验结果  
(a) 35 和 42 kN (b) 50 kN

Fig. 12 Results for stretch bending tests of profile at different tensile forces

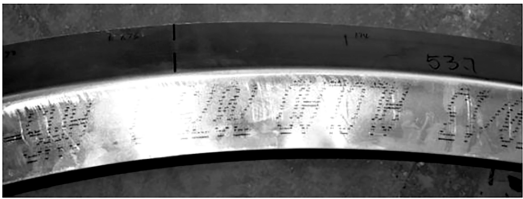


图 13 坯料初始宽度为 130 mm 时型材拉弯试验结果  
Fig. 13 Stretch bending test result for profile with initial width of 130 mm

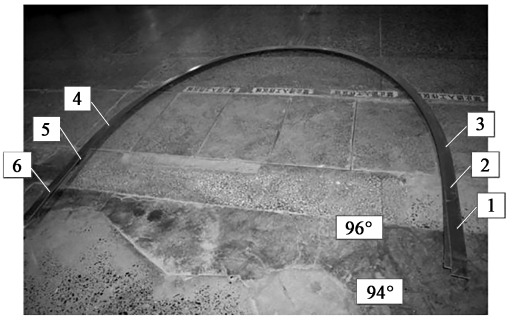


图 14 不同包覆角度的型材拉弯试验结果  
Fig. 14 Stretch bending test result for profile with different wrapping angles

隔 500 mm 进行回弹量的测量，测量结果如表 3 所示。通过仿真与试验结果可以看出，增加包覆角度，

可有效减小回弹量,提高零件拉弯的成形精度,从而减少零件成形后的敲修量,提高生产效率。

表 3 不同包覆角度下型材拉弯回弹量 (mm)

Table 3 Springback amounts for stretch bending of profile with different wrapping angles (mm)

测量点编号	包覆角度/(°)		差值
	94	96	
1	30	20	10
2	23	18	5
3	19	16	3
4	13	10	3
5	26	20	6
6	39	28	11

## 6 结论

(1) 增大拉伸力,零件截面内侧的切向拉应变增大,可有效减小零件内侧的起皱趋势,当拉伸力由 35 kN 增大至 42 kN 时,起皱现象得到有效抑制;但应变增加将导致截面收缩和厚度减薄加剧,当拉伸力继续增大到 50 kN 时,拉弯过程中型材长度中点位置附近发生断裂。

(2) 当坯料宽度从 140 mm 减小至 130 mm 时,拉弯过程中型材的最大等效应力、最大等效应变均减小,能够降低零件的破裂风险;但坯料初始宽度的确定需考虑零件后续数控加工的工艺余量。

(3) 增大包覆角度,可实现对拉弯成形中回弹的补偿,提高零件的成形精度,当包覆角度由 94° 增大至 96° 时,零件最大回弹量减小了 28% 左右。

(4) 获得了优化的拉弯工艺参数,即拉伸力为 42 kN、坯料初始宽度为 130 mm、包覆角度为 96°,利用该参数组合进行拉弯成形,零件未发生破裂,有效地避免了内侧起皱现象,减小了零件的回弹量。

### 参考文献:

- [1] Yumi Choi, Jinwoo Lee, Sudhy S Panicker, et al. Mechanical properties, springback, and formability of W-temper and peak aged 7075 aluminum alloy sheets; Experiments and modeling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 170: 105344.
- [2] 邓运来,张新明. 铝及铝合金材料进展 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (9): 2115-2141.

Deng Y L, Zhang X M. Development of aluminium and aluminium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (9): 2115-2141.

- [3] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.  
Editorial board of China Aeronautical Materials Manual. China Aeronautical Materials Manual [M]. Beijing: China Standards Press, 2001.
- [4] Chanmi Moon, Sandrine Thuillier, Jinwoo Lee, et al. Mechanical properties of solution heat treated Al-Zn-Mg-Cu (7075) alloy under different cooling conditions; Analysis with full field measurement and finite element modeling [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 856: 158180.
- [5] Saha P K. Aerospace Manufacturing Processes [M]. New York: Taylor & Francis Group, 2017.
- [6] 金森,周贤宾,李晓星,等. 大尺寸封闭截面铝型材拉弯工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2003, 10 (6): 46-49.  
Jin M, Zhou X B, Li X X, et al. Study on tensile bending technology of large size closed section aluminum profiles [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10 (6): 46-49.
- [7] Wade D A. Accurate FEA prediction of extrusion forming to improve aircraft design and manufacturing [J]. Boeing Publication, 2001.
- [8] 刁可山,周贤宾,李晓星,等. 矩形截面型材拉弯成形 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31 (2): 134-137.  
Diao K S, Zhou X B, Li X X, et al. Stretching and bending forming of rectangular section profiles [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31 (2): 134-137.
- [9] 金朝海,周贤宾,刁可山,等. 铝合金型材拉弯成形回弹的有限元模拟 [J]. 材料科学与工艺, 2004, 12 (4): 394-397.  
Jin C H, Zhou X B, Diao K S, et al. Finite element simulation of springback in tensile bending of aluminum alloy profiles [J]. Materials Science and Technology, 2004, 12 (4): 394-397.
- [10] Nanu N, Brabie G. Analytical model for prediction of springback parameters in the case of U stretch-bending process as a function of stresses distribution in the sheet thickness [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 64 (1): 11-21.
- [11] 卜晓珍,翟华,周丽华,等.  $\pi$  截面铝合金型材拉弯成形工艺数值模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (2): 151-161.  
Bu X Z, Zhai H, Zhou L H, et al. Numerical simulation research on stretch-bending process for  $\pi$ -section aluminum alloy profiles [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (2): 151-161.
- [12] GB/T 228.1—2010, 金属材料 拉伸实验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].  
GB/T 228.1—2010, Metallic material—Tensile—test—Part 1: Room temperature test method [S].