

# 铝合金型材弯曲成型及回弹数值模拟研究

解 旭

敏实集团, 浙江 宁波  
Email: xu.xie@minthgroup.com

收稿日期: 2020年12月30日; 录用日期: 2021年2月3日; 发布日期: 2021年2月18日

## 摘 要

铝合金作为汽车轻量化的主要材料, 具有广泛的应用前景, 如何准确评价铝合金型材弯曲成型及回弹性能对于工业生产具有重大的应用价值。针对铝合金型材的弯曲回弹, 本文采用ABAQUS数值软件进行了有限元模拟, 并将模拟结果与实验结果对比分析, 验证模拟的可靠性。利用仿真结果获得了型材弯曲回弹时应力、应变的变化情况, 给出了阻尼系数与回弹量误差之间的关系。结果表明, 回弹前各部位对应的应力、应变值均大于回弹后的, 应力、应变最大处基本在同一位置。回弹偏差受到阻尼系数的影响, 误差最小在10%, 因此数值模拟对实际产品生产有一定指导意义。

## 关键词

铝合金, 弯曲成型, 变形回弹

# Numerical Simulation Research on Bending Forming and Springback of Aluminum Alloy Profile

Xu Xie

Minth Group, Ningbo Zhejiang  
Email: xu.xie@minthgroup.com

Received: Dec. 30<sup>th</sup>, 2020; accepted: Feb. 3<sup>rd</sup>, 2021; published: Feb. 18<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

As the main material for automobile lightweight, aluminum alloy has a wide range of application prospects. Accurate evaluation of the bending forming and resilience performance of aluminum

alloy profiles has great application value for industrial production. Aiming at the bending springback of aluminum alloy profiles, ABAQUS numerical software was used in this paper to carry out finite element simulation, and the simulation results were compared with the experimental results to verify the reliability of the simulation. The simulation results were used to obtain the stress and strain changes of the profile during bending and springback, and the relationship between the damping coefficient and the springback error was given. The results show that the corresponding stress and strain values of each part before springback are larger than those after springback, and the maximum stress and strain are basically at the same position. The springback deviation is affected by the damping coefficient, and the minimum error is 10%. Therefore, numerical simulation has certain guiding significance for actual product production.

## Keywords

Aluminum Alloy, Bending Forming, Deformation Rebound

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

21 世纪以来能源危机和环境污染的问题越加严重, 汽车产量的巨大需求加快了能源的消耗, 如何降低汽车能耗成为了关注的对象, 而汽车轻量化是解决这一问题的较好措施。铝合金型材因其密度低、强度高、耐腐蚀等优点, 成为了汽车轻量化技术中合适的材料选择, 在汽车制造、加工等方面应用广泛[1]。

近几年, 交通用铝占比达到了 25%左右, 属于第二大用铝行业, 铝合金在市场的需求量逐步增加。相比于钢材, 铝合金伸缩率小、弹性系数低, 主要用于制造汽车结构件。在汽车零部件的加工过程中, 弯曲成型是影响产品质量的一个重要步骤, 在素材弯曲成型时, 回弹是必须考虑的因素。回弹过大或过小都会导致弯曲件尺寸精度低或产生缺陷等, 并且增加模具设计的难度, 加大后续试模、修模的工作量[2][3][4][5]。素材的不规则截面和变截面, 也使得弯曲回弹问题成为汽车零部件厂商关注的热点[6][7]。本文针对该问题进行分析研究, 采用数值模拟对铝合金型材进行三维建模, 模拟素材的弯曲回弹过程, 得到成型回弹的数据结果, 研究不同的成型原因和回弹的影响因素。通过对产品的测量与对比, 预测弯曲回弹量, 控制回弹大小, 在模具的设计过程中, 对回弹量进行一定的补偿, 进而生产出尺寸合格、精度较高的零部件, 为实际的加工生产提供可靠的依据和支持[8][9]。

## 2. 实验材料与方法

### 2.1. 材料力学性能测试

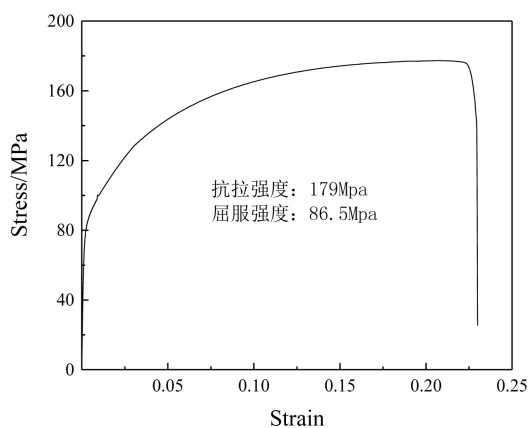
本工作中铝合金型材弯曲成型采用的素材是 6063 铝合金, 其化学成分如表 1 所示。

**Table 1.** Chemical composition of 6063 aluminum alloy (% mass fraction)

**表 1.** 6063 铝合金的化学成分(% 质量分数)

Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Ti	Al
0.4	0.1	0.65	0.1	0.1	0.1	0.35	0.1	余量

在电子万能材料试验机上进行素材的室温拉伸试验，从铝挤出并时效好的素材中切割一部分作为拉伸试样，其长度为 300 mm。通过对时效温度为 140℃ 的产品素材进行拉伸试验获得工程应力 - 应变曲线，如图 1 所示。



**Figure 1.** Stress-strain curve when the aging temperature is 140°C

**图 1.** 时效温度为 140℃ 时产品应力 - 应变曲线

由图 1 可见，素材在拉伸实验中经历了弹性变形阶段、屈服阶段、塑性强化阶段、缩颈变形阶段。弹性阶段中变形为可逆的，卸载后变形完全恢复；屈服阶段结束后，试样在塑性变形下产生应变，应力不断上升；试样在缩颈变形阶段时力不再增加，开始出现小裂纹，产生缩颈变形，最后完全断裂。

## 2.2. 成型工艺及试件实验

应用弯曲机和 CNC 机器人进行弯铣一体化技术，通过材料和结构的轻量化有效减轻了汽车质量，成为汽车节能减排的重要措施[10]。铝合金素材采用双臂伺服弯曲机进行 CNC 拉弯，先将素材进行预拉，然后拉弯成型至贴模，稳定后卸载回弹，获得实际产品。结果如图 2 所示，时效温度为 140℃ 的素材在回弹后与产品尺寸比较吻合，成型工艺对回弹量的影响较小。素材最大的回弹主要集中在端部，主要原因是弯曲角度在端部最大，约束载荷也造成截面处的拉应力和压应力分布较大。在成型过程中，素材由弹性变形阶段进入塑性变形，而固定端最先进入塑性变形阶段，当卸载弹性回复后，在固定端的塑性变形量较大。弯曲时素材 A 面受到的拉应力大于 B 面受到的拉应力，因此 A 面的变形更为明显。弯曲件外表面无明显裂纹或“橘皮现象”表明试件产品合格，实验结果较优。



**Figure 2.** Product molding diagram

**图 2.** 产品成型图

### 3. 铝合金型材弯曲回弹模拟

#### 3.1. 建立模型与模拟参数设置

本文采用 ABAQUS 非线性有限元分析软件对铝合金型材弯曲回弹过程进行模拟分析。模拟采用了 6063 系铝合金型材,长 1200 mm、宽 18 mm、厚 1 mm。材料密度  $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 杨氏模量为  $5.7 \times 10^4$ , 泊松比 0.33, 弹塑性参数选取本文实验数据, 模型整体结构如图 3 所示。

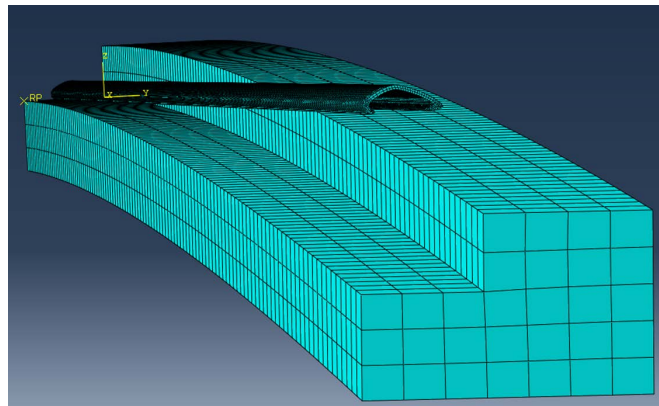


Figure 3. Model structure diagram  
图 3. 模型结构图

产品弯曲成型为大变形, 素材在弯曲和回弹过程中几何、材料和接触都是非线性的, 同时型材弯曲回弹是一个多重非线性耦合的复杂过程, 在回弹模拟中, 根据精度要求, 需要相对小的回弹误差和准确的回弹变形量[11]。因此本文针对模型进行了局部网格的细化, 并分为两个分析步进行模拟, 从而节省计算时间和提高收敛性。素材与模具之间的成型面为面接触, 将两者间的摩擦系数设置为 0.1。为保证计算精度, 网格采用自适应动态划分[12][13]。

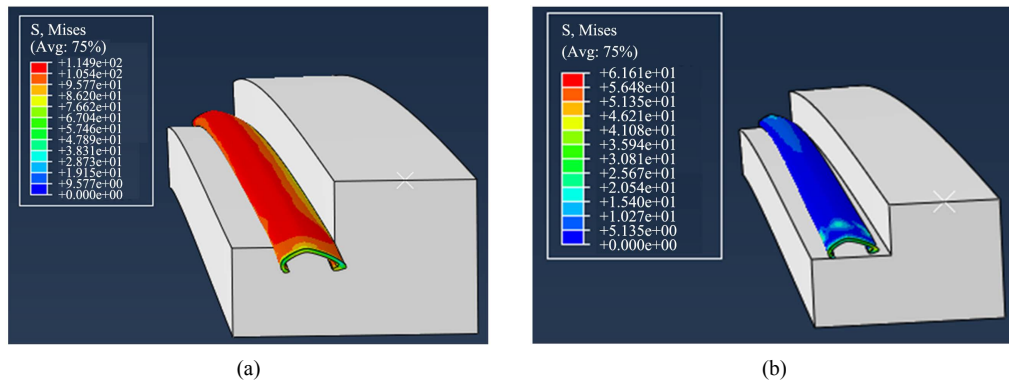
#### 3.2. 模拟与实验的结果对比

从本工作中的模拟结果表明成型贴模情况良好, 回弹计算精度较高, 无明显的失真波动现象。Y 向实际回弹距离 27.6 mm, Y 向模拟回弹距离 36.1 mm, 吻合度达 76.45%, 相对误差 23.5%; Z 向实际回弹 27.18 mm, Z 向模拟回弹 24.09 mm, 吻合度达 88.63%, 相对误差 11.3%。模拟回弹与实验结果在线弧、面弧均有偏差量, 面弧偏差更小。通过实验与模拟的对比, 弯曲和回弹的趋势基本一致, 较好地体现了模拟计算的适用性和准确性。

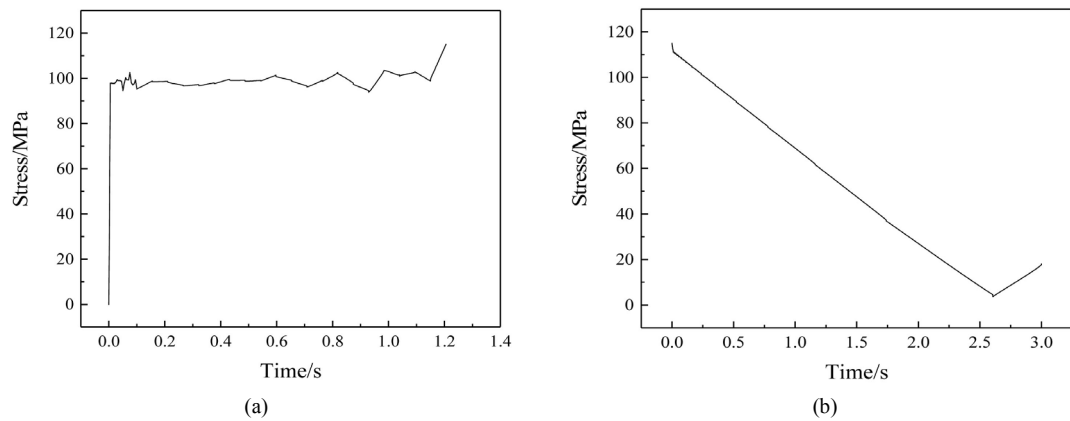
#### 3.3. 弯曲回弹前后的应力 - 应变分析

成型模拟中, 素材右端面采用端部速度控制, 以右部端面为 Y-Z 坐标平面, 使端面沿 Y 和 Z 方向在一定时间内进行指定速度的移动, 移动终止位置为完全贴模时。素材贴模后进行卸载回弹, 获得回弹模拟结果。素材的成型与回弹终止时应力结果如图 4、图 5 所示。

从图 4(a)、图 4(b)可以看出回弹前后素材的应力分布呈现出从左到右变大的趋势, 应力最大处在素材右端(固定端为左), 由于卸载使得回弹后的整体应力值均小于回弹前的应力值。图 5(a)、图 5(b)显示了成型过程中应力最大处的变化趋势, 素材在加载过程中, 应力随着时间增加而增加, 在加载结束时, 素材完全贴模; 在卸载过程中, 应力逐渐减小, 模拟的结果符合实验结果, 为实际生产提供了较好的理论基础。

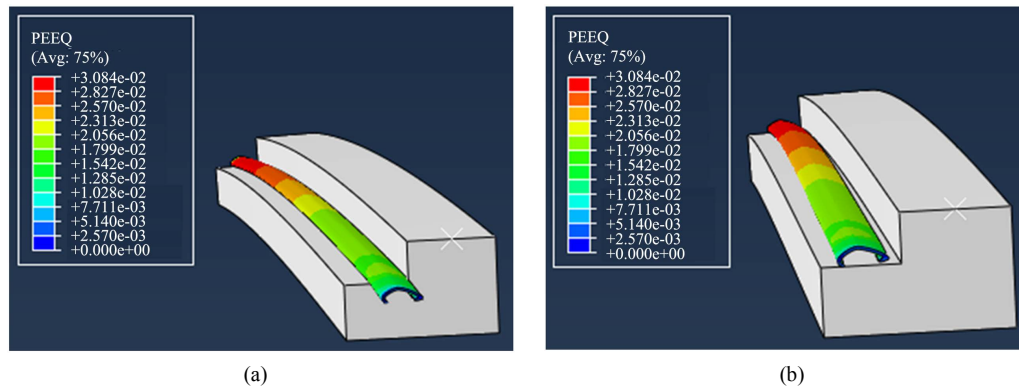


**Figure 4.** (a) Equivalent stress distribution before springback; (b) Equivalent stress distribution after rebound  
**图 4.** (a) 回弹前等效应力分布; (b) 回弹后等效应力分布

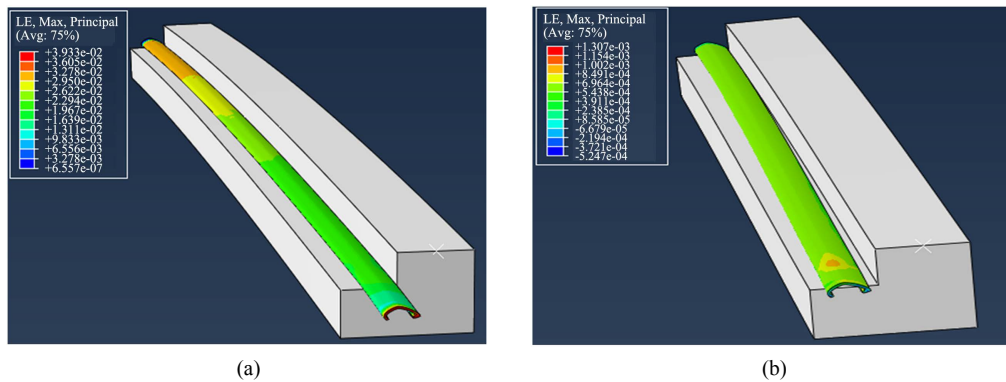


**Figure 5.** (a) Stress-time diagram before rebound; (b) Stress-time diagram after rebound  
**图 5.** (a) 回弹前应力 - 时间图; (b) 回弹后应力 - 时间图

为了进一步分析素材的回弹情况，其等效塑性应变和应变分布见图 6、图 7 所示。图 6(a)、图 6(b) 结果表明回弹前后素材的等效塑性应变分布从左到右逐渐减小，最大处在素材固定端，表明在成型过程中固定端受约束影响塑性应变较大。图 7(a)、图 7(b) 显示了回弹前后的应变分布，由于素材的部分弹性回复，应力释放，回弹后各部分对应的应变值明显小于回弹前的应变值，应变最大处在素材右端，应力应变最大处基本在同一位置，模拟的应力应变结果符合实验结果，验证了模拟计算的可靠性和准确性。



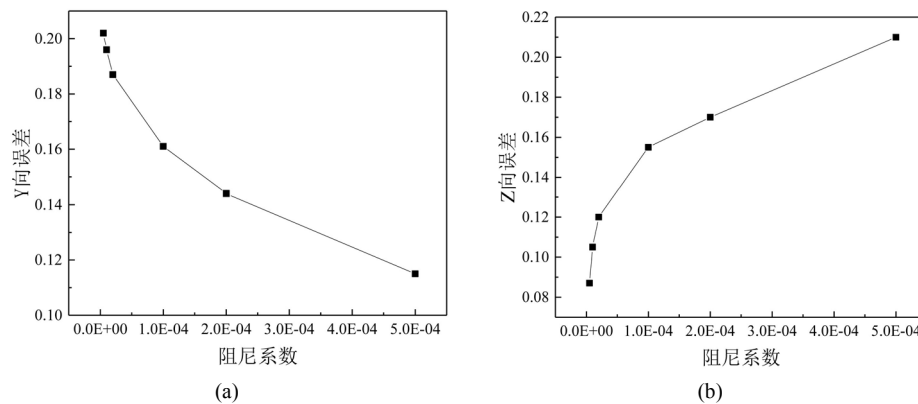
**Figure 6.** (a) Equivalent plastic strain before springback; (b) Equivalent plastic strain after springback  
**图 6.** (a) 回弹前等效塑性应变; (b) 回弹后等效塑性应变



**Figure 7.** (a) Strain distribution before springback; (b) Strain distribution after springback  
**图 7.** (a) 回弹前应变分布; (b) 回弹后应变分布

#### 4. 不同阻尼系数对弯曲回弹的影响

回弹主要表现为整体卸载回弹、切边回弹和局部卸载回弹，当回弹量超过允许误差后，就会出现成型缺陷，导致零件的尺寸精度不合格。在模拟过程中，弯曲回弹的素材作为可变形体，阻尼系数会对弯曲的回弹量产生影响[14]。通过对不同阻尼系数的回弹模拟，可以获得与回弹量误差之间的对应关系和影响规律，结果如图 8 所示。



**Figure 8.** (a) Y-direction rebound error-damping coefficient curve; (b) Z-direction rebound error-damping coefficient curve  
**图 8.** (a) Y 向回弹量误差 - 阻尼系数曲线; (b) Z 向回弹量误差 - 阻尼系数曲线

从图 8(a)、图 8(b)中可以看出 Y 向的回弹偏差随着阻尼系数的增大而减小，误差最小在 12%，阻尼系数为  $5e^{-4}$ ，但对于模拟的收敛性也相应变差；Z 向的回弹偏差随着阻尼系数的增大而增大，误差最小在 10%左右，阻尼系数为  $1e^{-5}$ ，同时表现出对弯曲回弹量有较大的敏感性。虽然不同阻尼系数的仿真结果与实际产品存在差异，但是在回弹方向上基本一致，并且整体部位的回弹与实验结果符合较好。

#### 5. 结论

1) 针对铝合金弯曲回弹的数值模拟，建立了三维有限元模型，模拟了型材的弯曲回弹过程，分析了回弹的影响因素。通过模拟与实验的结果对比，验证了模拟的可靠性和准确性。

2) 模拟与实验结果的回弹趋势吻合较好，回弹前应力随时间增加而增加，回弹前各部分应力、应变值均大于回弹后的应力、应变值，应力应变最大处基本在同一位置。通过对应力、应变的变化分析出素材弯曲回弹的风险点，提前做好预处理，为模具设计提供科学依据，优化模具设计。

3) 通过改变回弹阻尼系数进行模拟分析, 结果表明 Y 向的回弹偏差随阻尼系数增大而减小, 误差最小在 12%, 阻尼系数为  $5e^{-4}$ ; Z 向的回弹偏差随阻尼系数增大而增大, 误差最小在 10%, 阻尼系数为  $1e^{-5}$ 。对阻尼系数的研究可以有效分析回弹量, 提高产品尺寸精度。

## 参考文献

- [1] 宋政璞, 韩学剑, 邵竑泽. 高强度组合式铝合金工业平台国内外研究现状及发展趋势分析[J]. 中国设备工程, 2020(11): 251-253.
- [2] 王亮, 刘京涛. 铝合金汽车板材弯曲性能测试方法[J]. 理化检验(物理分册), 2019, 55(8): 569-571.
- [3] 马青梅, 张悦, 刘兴武, 钟伟柱, 王聪. 铝合金型材力学及弯曲性能的影响因素[J]. 热处理技术与装备, 2017, 38(3): 33-37.
- [4] Zhang, W.P., Hu, Z.L., Li, H.H., *et al.* (2019) Experimental and Numerical Investigation on Springback of Automotive Aluminum Alloy Sheet. *Rare Metal Materials and Engineering*, **48**, 2130-2137.
- [5] Hu, Z., Cheng, H., Jiang, B., *et al.* (2013) Simulation on Springback of V-Shaped Stamping Aluminum Alloy Sheet for Lightweight Automobile. *Hot Working Technology*, **42**, 89-92.
- [6] 郭佳. 基于数值模拟的铝合金矩形管变形回弹问题研究[J]. 铸造技术, 2014, 35(12): 3003-3004, 3007.
- [7] 王晓林, 周贤宾. 金属板弹塑性非圆弧弯曲回弹的计算[J]. 塑性工程学报, 1996(4): 27-33.
- [8] Bu, X., Zhai, H., Zhou, L., *et al.* (2019) Numerical Simulation Research on Stretch-Bending Process for Pi-Section Aluminum Alloy Profiles. *Journal of Plasticity Engineering*, **26**, 151-161.
- [9] Wu, J., Xiong, W., Luo, Z., *et al.* (2015) Finite Element Simulation of Stretch Bending on Aluminum Alloy Extrusions. *Forging & Stamping Technology*, **40**, 54-59.
- [10] 蔡洋, 王小松, 苑世剑. 预弯对铝合金管材内高压成形缺陷与尺寸精度的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 108-115.
- [11] 余国庆, 鲁世红. 基于有限元分析的铝合金板料弯曲回弹的影响因素研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(9): 1077-1080, 1117.
- [12] 肖冠云, 谢世坤, 黄菊花, 郑慧玲. 基于 PFEA、ANN 和 GA 的 U 形件成形板料形状优化[J]. 模具工业, 2006, 31(12): 1-5.
- [13] 韩雄伟, 李欣星, 陈祖红. 基于 BP 神经网络的铝合金板料弯曲回弹控制研究[J]. 模具工业, 2011, 37(9): 22-26.
- [14] 刁法玺, 张凯锋. 板料 V 形弯曲回弹的动力显式有限元分析[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(2): 170-174.