

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.035

# 管材多辊弯曲成形及其回弹有限元分析

李朝宇<sup>1</sup>, 钱余海<sup>2</sup>(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;  
2. 山东铝谷产业技术研究院有限公司, 山东 邹平 256200)

**摘 要:**为探究弯管成形过程中回弹的影响规律,提高加工精度,以 6061-T6 铝合金管材为例,利用 ABAQUS 有限元软件进行仿真实验,探究弹性模量、泊松比、管壁厚度等材料参数和送料速度、摩擦因数等工艺参数对管材弯曲回弹的影响。结果表明:在 3 项材料参数中泊松比对管材弯曲回弹角度的影响最小,壁管厚度的影响程度最大,工艺参数中摩擦因数的增加会使回弹角度先增加后减小,送料速度的影响程度小于摩擦因数。

**关键词:**滚弯成形;有限元;弯曲回弹;材料参数;工艺参数

**中图分类号:** TG386.3+1 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2024)04-0182-05

## FEM Analysis on Multi-roll Bending Forming and Springback of Tubes

LI Chaoyu<sup>1</sup>, QIAN Yuhai<sup>2</sup>(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Shandong Aluminum Valley Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Zouping 256200, China)

**Abstract:** In order to explore the influence law of springback in bend forming process and improve the processing accuracy, taking 6061-T6 aluminum alloy pipe as an example, conducts simulation experiments by ABAQUS finite element software, and explores the influence of material parameters of elastic modulus, Poisson's ratio, pipe wall thickness and process parameters of feeding speed and friction coefficient on pipe bending and springback. The results show that Poisson ratio has the smallest effect on the springback angle of the tube bending, while wall tube thickness has the largest effect. The increase of friction coefficient will make the springback angle increase first and then decrease, and the effect of feeding speed is less than that of friction coefficient.

**Keywords:** roll bending; FEM; bending springback; material parameters; process parameters

## 0 引言

随着中国航天、车船、石化工业等领域的不断发展,各行业对新型弯管的需求不断增加,弯管作为工业生产的大命脉,是为各种航天飞船、车船设备提供源源不断的油、水、气等资源的大血管。这些金属弯管是航天发动机管路系统的重要组成部分,同时也是车辆、船舶管路系统及石化环境控制系统不可或缺的组件。根据相关文献,为了提高管路系统空间利用率,许多流体管道输送系统关键部位的弯曲管材空间使用率达到 90% 左右。因此为了在有限空间内布置如此高密度的弯曲管材,并确保每一个弯管能满足运输和使用寿命的要求,这促进了新的弯曲材料和管弯曲成形工艺的开发和持续改进。

铝合金弯曲构件作为一种轻质、高比强度、耐腐蚀、低密度的构件,是现代航空航天管道系统和

车船管道系统中应用最广泛的关键材料。在我国研制的某型战斗机的管路系统中,铝合金构件占弯曲构件的 40%。国外空客 A320 客机中铝合金弯曲件占比 41.8%,充分体现了铝合金弯曲件在各类工业设备管道系统中的重要地位。

尽管有上述优点,但铝合金弯曲件在实际弯曲过程中难免存在固有缺陷。管材弯曲回弹是影响管材弯曲成形的重要因素,几乎所有形式的管材弯曲成形过程中都存在弯曲回弹现象。这将严重降低管材弯曲成形的几何精度,而且在管材几何形状拥挤的情况下,在管道系统中不仅会对管道空间布置产生极大的挑战,还会改变流体输送路线的方向,这导致在输送过程中产生较大的阻力。因此探究管材弯曲成形过程中各项参数对回弹的影响规律是十分必要的。

郭训忠等<sup>[1]</sup>对数控滚弯与三维自由弯曲技术做了研究,并进一步在工艺优化方面取得了一定

第一作者简介:李朝宇(1999—),男,四川广安人,硕士研究生,研究方向为钣金塑性成形,905225660@qq.com。

的创新性成果。万鹏等<sup>[2]</sup>进行了小直径厚壁数控弯管的回弹仿真与试验,分析管材壁厚、弯曲半径、弯曲速度对弯曲回弹半径的影响。杜春江等<sup>[3]</sup>对非均匀厚壁管料折弯仿真并进行试验,表明仿真计算能快速地对折弯特性进行分析。任胜乐等<sup>[4]</sup>系统地总结了各国研究人员通过理论、有限元仿真、实验研究等方法在管材弯曲方面的研究进展,并提出结合数据库等就能控制研究方法进行更深入研究。吴磊等<sup>[5]</sup>对管材弯曲的特性与管材弯曲成形工艺做了研究,指出了目前存在的一些问题,并对无模冷成形技术进行了论述。张深等<sup>[6]</sup>对多种材料与不同截面形状的金属弯管件进行了研究,发现实验法对解决回弹问题的有效手段。徐雪峰等<sup>[7]</sup>对内胀冷推弯工艺进行了研究,发现内压的增加能有效减少截面畸变,同时侧壁的减薄趋势将增大,其相对壁厚越大,畸变越大。WU 等<sup>[8]</sup>通过理论模型、有限元模型和实验研究了三维金属管材的回弹行为,研究发现回弹后弯曲半径和弯曲角度均会随着加载指数的增大而增大,合理地控制加载指数有利于提高预测精度。

本文将以 6061-T6 铝合金为研究对象,管材弯曲的整体参数为管径 32 mm,弯曲角度 720°,螺旋角度 2°,弯曲半径 160 mm。其仿真结果如图 1 所示。

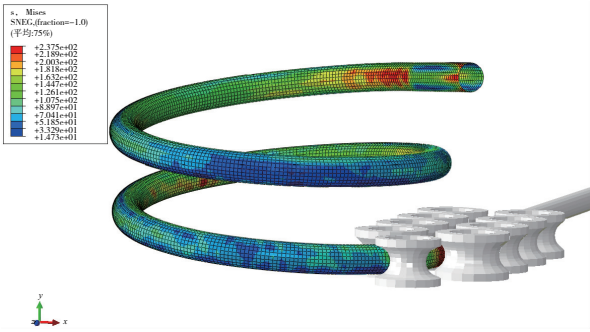


图 1 多辊弯曲仿真图

1 管料拉伸试验

本文所研究的管材材料为 6061-T6 铝合金,分别对壁厚为 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm 的管材进行单向拉伸试验。由电火花线切割机进行试样切割,具体试样如图 2 所示。

使用三思纵横科的 UTM5504X 型电子万能试验机进行试验,如图 3 所示。试样的拉伸速度均为 1 mm/s。



图 2 拉伸试样



图 3 拉伸试验机

试验所得数据为拉伸力  $F$  与变形量  $\Delta L$  的关系,通过数据处理能够得到 6061-T6 铝合金管材的各项材料参数,如表 1 所示。

表 1 6061-T6 管材材料参数

| 壁厚/<br>mm | 弹性<br>模量/GPa | 屈服<br>强度/MPa | 强度<br>系数 | 硬化<br>指数 |
|-----------|--------------|--------------|----------|----------|
| 1.0       | 63.981       | 214.81       | 297.12   | 0.057    |
| 1.5       | 60.303       | 206.64       | 304.26   | 0.073    |
| 2.0       | 60.955       | 216.81       | 312.12   | 0.070    |
| 2.5       | 64.748       | 204.11       | 310.22   | 0.067    |
| 3.0       | 62.979       | 209.63       | 300.23   | 0.058    |

2 有限元分析法

本文将利用 ABAQUS 仿真软件对多辊弯曲过程进行分析。ABAQUS 仿真软件是一款功能强大的工程软件,其有丰富的材料模型库,可以模拟多种工程材料的性能。该软件广泛应用在各类工程作业中,为人们的生产制造提供了非常便利的方式。管材有限元仿真流程如图 4 所示。



图 4 仿真流程图

导向辊的直径为 29 mm,成形辊的直径为 19 mm,共有 8 个导向辊和 1 个成形辊。在弯曲角度为 90°、弯曲半径 160 mm 的条件下探究各项材料参数与工艺参数对弯曲角度回弹的影响规律。多辊滚弯的结构如图 5 所示。

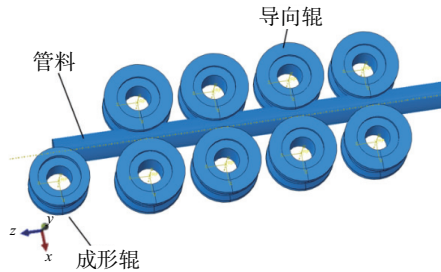


图 5 多辊滚弯的结构图

ABAQUS 仿真的操作步骤如下。

设置材料属性:材料密度为  $2.75\text{ kg/mm}^3$ ,弹性模量为 63.98 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 214.81 MPa,硬化指数为 0.057,强度系数为 297.12。管料设置为壳单元,壳厚度设置为 1 mm。

在分析步中设置动态、显式求解器,时间长度设置为 40.212 4。

设置管材的边界条件,分别设置成形辊的位移,导向辊固定且沿轴向自由,以  $10\text{ mm/s}$  的速度推动管材沿导向管运动。

对管材模型划分网格,采用壳单元网格,网格类型为 S4R,网格大小为 4,成形辊与导向辊为解析刚体,不划网格。

最后创建仿真作业,并查看后处理结果。

3 材料参数对回弹过程的影响规律

材料的力学参数是影响材料塑性成形的重要因素,本节基于 ABAQUS 有限元软件,以单因素法对弹性模量、泊松比、管材壁厚在弯曲成形过程中的回弹影响规律进行研究。

3.1 弹性模量对回弹的影响规律

弹性模量是衡量管材多辊弯曲回弹难易程度的重要参数,弹性模量越大,材料在相同的应力条件下发生的弹性变形越小。本小节将会改变管材弹性模量的值来进行管材的多辊弯曲回弹模拟,探究弹性模量对于回弹的影响规律。选取的弹性模量分别为 60 GPa、70 GPa、80 GPa、90 GPa、100 GPa,如表 2 所示。有限元仿真得到的实验结果如图 6 所示。

表 2 弹性模量影响的试验方案

| 序号  | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 壁厚/mm |
|-----|----------|-----|-------|
| 1-1 | 60       | 0.3 | 1     |
| 1-2 | 70       | 0.3 | 1     |
| 1-3 | 80       | 0.3 | 1     |
| 1-4 | 90       | 0.3 | 1     |
| 1-5 | 100      | 0.3 | 1     |

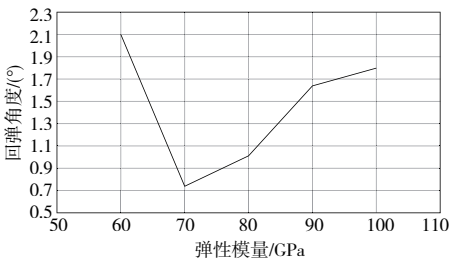


图 6 不同弹性模量的管材弯曲回弹角度

由图 6 可知,在一定范围内随着弹性模量的减小会造成管料弯曲回弹的减小,但当弹性模量为 60 GPa 时回弹角度反而最大。因此可以看出弹性模量是影响管料多辊弯曲回弹的重要因素之一。

3.2 泊松比对回弹的影响规律

泊松比是衡量材料横向变形能力大小的参数,在多辊弯曲过程中弯曲模具会作用一个推力和弯矩于管材,管材内部同时会产生轴向、周向应力。因此泊松比不同的材料产生相同轴向应力,但会产生不同的周向应力。当弯曲模具卸载时,管材内部的轴向和周向应力会同时释放,不同周向应力的管料发生弹性恢复的程度不同。按表 3 参数设计实验,所得到的仿真结果如图 7 所示。

表 3 泊松比影响的试验方案

| 序号  | 弹性模量/GPa | 泊松比  | 壁厚/mm |
|-----|----------|------|-------|
| 2-1 | 80       | 0.20 | 1     |
| 2-2 | 80       | 0.25 | 1     |
| 2-3 | 80       | 0.30 | 1     |
| 2-4 | 80       | 0.35 | 1     |
| 2-5 | 80       | 0.40 | 1     |

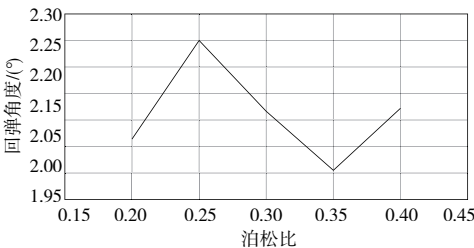


图 7 不同泊松比的管材弯曲回弹角度

由图 7 可知,弯曲的回弹角度的变化随泊松比的改变不大,且在一个小范围内波动。由此可见泊松比对于回弹虽有影响但影响程度没有弹性模量大。

### 3.3 管材壁厚对回弹的影响规律

管料壁厚是管材的几何参数之一,本次模拟采用的管材管径为 32 mm。由于管材壁厚的不同,在多辊弯曲成形结束后参与弹性释放的材料会有所不同。壁厚越厚的管材参与弹性释放的材料越多,因此壁厚会是影响管材多辊弯曲回弹的因素。

本节将按表 4 参数进行仿真实验,弹性模量取拉伸实验结果。选取壁厚分别为 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm 壁厚的管材进行多辊弯曲有限元仿真,仿真结果如图 8 所示。

表 4 管材壁厚影响的试验方案

| 序号  | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 壁厚/mm |
|-----|----------|-----|-------|
| 3-1 | 64       | 0.3 | 1.0   |
| 3-2 | 60       | 0.3 | 1.5   |
| 3-3 | 61       | 0.3 | 2.0   |
| 3-4 | 65       | 0.3 | 2.5   |
| 3-5 | 63       | 0.3 | 3.0   |

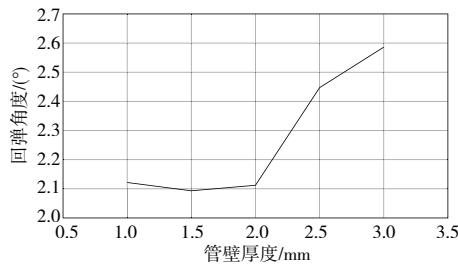


图 8 不同管材壁厚的管材弯曲回弹角度

由图 8 可以看出壁厚在 1~3 mm 的变化范围内,管材的回弹角度随着管材的壁厚增大而增大,在 2~3 mm 变化范围内的影响较大,且变化幅度超过了弹性模量与泊松比,故在实际的加工过程中需要着重考虑到壁厚的影响。

## 4 工艺参数对回弹过程的影响规律

为了改善管材多辊弯曲成形精度,需要详细地研究工艺参数对多辊弯曲回弹的影响规律,并确定最优工艺参数。本节针对多辊弯曲成形的工艺特点,分别研究送料速度与摩擦因数对管材多辊弯曲回弹的影响。

### 4.1 送料速度对回弹的影响规律

管材送料速度影响着管材弯曲变形的程度,增大管材塑性流动的能力,这会导致材料的加工硬化和塑性的降低,影响着管材多辊弯曲回弹恢复的程度。选取的管材送料速度分别为 6 mm/s、8 mm/s、10 mm/s、12 mm/s、14 mm/s(表 5),仿真实验的结果如图 9 所示。

表 5 送料速度影响的试验方案

| 序号  | 送料速度/(mm/s) | 摩擦因数 |
|-----|-------------|------|
| 4-1 | 6           | 0.5  |
| 4-2 | 8           | 0.5  |
| 4-3 | 10          | 0.5  |
| 4-4 | 12          | 0.5  |
| 4-5 | 14          | 0.5  |

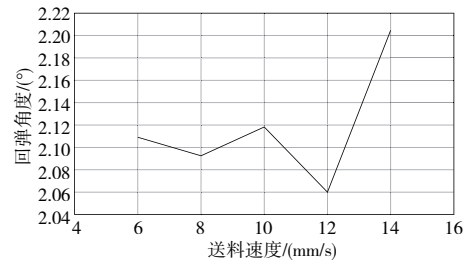


图 9 不同送料速度的管材弯曲回弹角度

由图 9 可知,送料速度对于管材的弯曲回弹也同样存在着影响,送料速度对回弹角度的影响并不是线性影响。在此项试验中推料速度设置为 12 mm/s 最为合适,弯曲成形的回弹角度最小。

### 4.2 摩擦因数对回弹的影响规律

管材在多辊弯曲成形过程中始终与弯曲模具接触,因此在接触面上会有摩擦力阻碍管材弯曲时的塑性流动,而不同的摩擦因数会引起不同的摩擦力,导致管材弯曲时的应力也不同,从而影响管材弹性应力释放。选取的摩擦因数分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5(表 6)。仿真实验结果如图 10 所示。

表 6 摩擦因数影响的试验方案

| 序号  | 送料速度/(mm/s) | 摩擦因数 |
|-----|-------------|------|
| 5-1 | 10          | 0.1  |
| 5-2 | 10          | 0.2  |
| 5-3 | 10          | 0.3  |
| 5-4 | 10          | 0.4  |
| 5-5 | 10          | 0.5  |

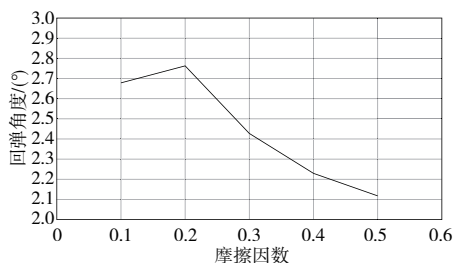


图 10 不同摩擦因数的管材弯曲回弹角度

由图 10 可知,在管材弯曲的过程中回弹角度会随着摩擦因数的减小先增大后减小,在摩擦因数为 0.2 时回弹角度达到最大值,随后继续增大摩擦因数能有效减小回弹角度。

## 5 结语

1) 研究表明,材料参数中弹性模量、泊松比、管材壁厚对管材多辊弯曲回弹有着不同程度的影响,其中泊松比的影响最小,在 0.25 时达到最大值,0.35 时为最小值,减小了 10.98%;管材壁厚对回弹角度的影响程度最大,回弹角度随着壁厚的增加而增加,在壁厚为 1.5 mm 时弯曲回弹角度最小,相比于 3 mm 壁厚时的回弹角度减小了 19.08%。在加工管壁较厚的材料时应重点考虑到回弹角度对加工精度的影响。

2) 在工艺参数中摩擦因数也是影响管材多辊弯曲回弹的重要因素,在摩擦因数为 0.2 时回弹角度达到最大值,继续增大摩擦因数有利于减小

回弹角度,在实际的加工过程中合理地利用润滑脂可以有效地减小摩擦因数对弯曲回弹角度的影响。送料速度对弯曲回弹角度的影响较小,在此项试验中最佳的送料速度为 12 mm/s,相比于送料速度 14 mm/s 时减小了 6.71%。

## 参考文献:

- [1] 郭训忠,陶杰,王辉.航空导管先进成形技术的研究进展[J].南京航空航天大学学报,2020,52(1):12-23.
- [2] 万鹏,刘振,姜银方.小直径厚壁管回弹的有限元仿真及试验[J].热加工工艺,2015,44(3):159-161.
- [3] 杜春江,瞿亦峰,陈亚峰.非均匀厚壁管料弯折成形及回弹仿真[J].机床与液压,2011,39(17):126-127,56.
- [4] 任胜乐,赖一楠,张元,等.管材弯曲成形理论与技术研究进展[J].哈尔滨理工大学学报,2011,16(6):31-35.
- [5] 吴磊,张亚民,黄凯东.弯管成形工艺及管材弯曲特性的研究现状[J].机电产品开发与创新,2016,29(4):23-25.
- [6] 张深,吴建军,王强,等.金属管材弯曲成形回弹问题研究[J].航空制造技术,2014,57(10):45-50.
- [7] 徐雪峰,邱泽宇,华如雨,等.内压与相对壁厚对薄壁管材弯曲成形的影响[J].塑性工程学报,2018,25(6):77-84.
- [8] WU J J, ZHANG Z K, SHANG Q, et al. A method for investigating the springback behavior of 3D tubes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131/132:191-204.

收稿日期:2022-11-25

(上接第 168 页)

## 参考文献:

- [1] 秦振浩.基于多种群遗传算法和剩余矩形匹配算法不规则件优化排样[J].现代工业经济和信息化,2022,12(9):222-224.
- [2] UMETANI S, MURAKAMI S. Coordinate descent heuristics for the irregular strip packing problem of rasterized shapes [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 303(3):1009-1026.
- [3] 刘斌.基于 HAPE 的二维不规则零件排样算法及其性能研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [4] 王莉.矩形件排样问题的遗传模拟退火混合求解算法[J].锻压技术,2021,46(8):70-76.
- [5] 刘海明,周炯,吴忻生.应用临界多边形方法与小生境遗传算法求解不规则排样问题[J].小型微型计算

机系统,2016,37(5):1002-1007.

- [6] 陈燕,谢琪琦,刘咏,等.圆形件下料顺序分组启发式算法的设计与实现[J].图学学报,2017,38(1):5-9.
- [7] 罗强,李世红,袁跃兰,等.基于复合评价因子的改进遗传算法求解矩形件排样问题[J].锻压技术,2018,43(2):172-181.
- [8] 谭同德,吴强,赵红领,等.OBB 层次包围盒构造方法的改进[J].计算机工程与应用,2008,44(5):79-81,95.
- [9] 王仕存,唐敦兵,朱海华,等.基于改进粒子群算法求解分布式多工厂生产调度问题[J].机械制造与自动化,2021,50(4):9-13.

收稿日期:2023-02-13