



# 大型复杂截面型材拉弯成形数值模拟

孟鹏飞<sup>1</sup> 李晓星<sup>1</sup> 金朝海<sup>1</sup> 高宏志<sup>1</sup> 尹萍<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 首都航天机械公司, 北京 100076)



**摘要:** 对一种复杂截面型材的拉弯成形过程进行了有限元数值模拟分析。通过模拟试验得到最佳的模具与型材间隙; 通过分析预拉量和补拉量对截面畸变和回弹的影响, 得出最佳加载过程参数。对大尺寸异型截面型材的模拟过程进行了优化, 解决了拉弯成形模拟中动态效应明显、计算量过大等问题。

**关键词:** 型材拉弯; 数值模拟; 模具与型材间隙; 复杂截面型材; 加载过程

## Numerical Simulation on Profile Stretch-bending with Large Complex Cross Section

Meng Pengfei<sup>1</sup> Li Xiaoxing<sup>1</sup> Jin Chaohai<sup>1</sup> Gao Hongzhi<sup>1</sup> Yin Ping<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191;

2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

**Abstract:** This paper deals with the stretch-bending process of an extruded aluminum profile 2A12-O which possesses complex cross section and large length dimension through ABAQUS. The proper clearance between die and profile was probed and obtained. A set of best loading parameters were determined by studying the influence of pre-stretch and post-stretch on distortions and springback. With material property inputted directly from experiments, the overall stretch-bending process of this aluminum profile was simulated and optimized, greatly eliminating potential forming defects.

**Key words:** profile stretch bending; numerical simulation; die and profile clearance; complex cross section profile; loading process

### 1 引言

型材拉弯制件的生产加工是结构轻量化进程中的重要内容。随着工业的发展, 型材截面越来越复杂, 不断给制造单位提出难题。不同截面及尺寸的型材在拉弯成形中易出现的缺陷不同, 传统的经验法已不足以对新出现的截面型材的成形过程进行生产指导。数

值模拟的准确性经过很多学者的认可, 应用其进行成形工艺研究, 确定加载方式, 减小和预防截面畸变, 可为实际生产提供可靠的指导。

本文针对一种大尺寸、复杂截面型材的拉弯过程进行数值模拟分析, 通过模拟实验设计出合理的模具及型材间隙尺寸; 并对其加载过程对截面畸变及回弹的影响进行一系列模拟试验, 得出最佳的预拉量和补

作者简介: 孟鹏飞 (1985-), 硕士, 航空宇航制造工程专业; 研究方向: 板料成形。  
收稿日期: 2010-10-19

拉量。

## 2 有限元模型

### 2.1 零件特征分析

图 1 所示零件为半圆弧形，半径  $R=2598.5\text{mm}$ ，壁厚  $t=6、8\text{mm}$ ，为大尺寸的复杂异型截面型材。由于零件长度方向跨度很大（约 8m，由对称性取 1/2 模型进行计算，考虑给夹持端预留的长度，材料长度达 4.5m。）

### 2.2 型材力学性能的确定

型材所用的材料为铝合金型材 2A12-O，初始退火状态材料性能由单拉试验获得（见表 1），单拉试样直接在型材上用电火花线切割获得。

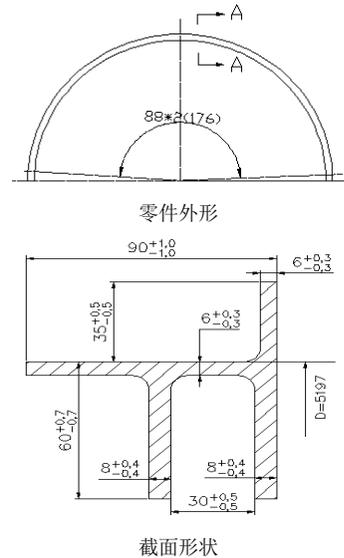


图 1 大尺寸复杂截面型材零件

表 1 铝合金型材 2A12-O 性能参数

$E/\text{MPa}$	$\nu$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$
71729	0.367	153.52	256.28
$\delta_w/\%$	$r_0$	$K$	$n$
23.5	0.66763	329.105	0.1445

### 2.3 力学和位移边界条件

在 Abaqus 中，采用位移和角度控制方式。在拉弯过程中，为了保持材料的张紧状态，在弯曲过程中对型材附加拉伸增量，因此，在预拉阶段，控制夹钳运动使型材沿长度方向伸长。加载速度为 400mm/s，位移加载曲线采用在 step 中定义 smooth step 的方式。

弯曲阶段，模具固定不动。在与型材刚性连接的夹钳拉力中心设置参考点，在参考点上施加随着参考点的转动而转动的随动力，所加载荷为  $F=\sigma \times S$  ( $\sigma$  取决于所加预拉量的大小)，并控制夹钳参考点每一时刻相对于模具绕 z 轴的旋转角度，以此来实现对张臂式拉弯成形的动作仿真。

补拉阶段，控制夹钳沿夹钳所在位置切线方向的位移，以使得型材能进一步贴模，减小回弹。

### 2.4 网格划分

由于对称性，取型材的 1/2 进行分析。对型材采用 S4R 壳单元离散化，截面划分为 29 个单元，其中横缘 12 个，上腹板 5 个，下面两个腹板各 6 个。沿型材长度方向可变形部分为 150 个。网格长:宽 $\approx$ 4，以保证静态回弹收敛。厚向积分点 5 个。模具和夹持端部分定义为刚体。模拟中采用 Hill'48 各向异性屈

服准则。采用库伦摩擦定律处理型材与模具间的摩擦接触，摩擦系数取为  $\mu=0.15$ 。夹钳旋转角速度为 0.803rad/s。

### 2.5 双精度及圆角处理

在模拟中采用双精度的计算方式，可大大降低计算过程中的舍入误差，有效减小误差的积累，获得精度较高的计算结果。

型材截面尺寸上存在过渡小圆角，半径为 2mm。在有限元模拟中，此类小圆角半径对模拟结果影响不大，故将毛料圆角去掉进行模拟。

## 3 模具与型材间隙设计

### 3.1 成形缺陷衡量参数

这种型材在拉弯过程中，主要的缺陷形式有截面畸变、回弹后半径增大及回弹后空间扭转。因此，分别将这几种缺陷形式作为不同试验组合的衡量参数，如图 2 所示。

本文中以 e3、e5 位置回弹前后半径的变化量为观察量，即模具凹槽的半径为 2538.5mm。

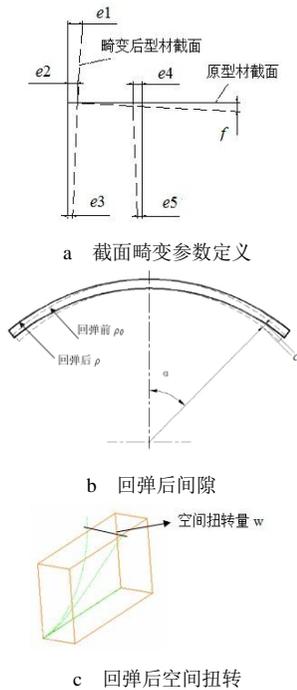


图2 型材成形缺陷衡量参数

### 3.2 模具与型材间隙设计

实际生产中, 型材拉弯过程较普遍采用的一种方法是在退火状态下预拉-弯曲, 之后进行淬火热处理, 在新淬火状态下进行补拉。由于型材在拉伸过程中厚度会减薄, 同时弯曲过程中下缘受压厚度会增大, 而热处理过程也会对型材厚度及外形产生一定的影响, 因此模具与型材的间隙应足以使型材在热处理后能够顺利放入模具中为宜。但同时间隙过大, 会降低成形精度。这使得间隙设计成为首先要研究的问题。

模具与型材之间的间隙可设计成图 3a 所示对称形及图 3b 所示不对称形。

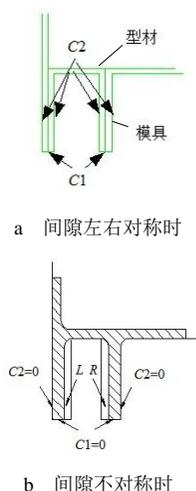


图3 模具与型材间隙示意图

### 3.3 结论

#### 3.3.1 间隙对称时 (见表 2)

试验号 1~8 中, 型材最小厚度均在 5.892mm, 对厚度影响不大。

$C1$  由-0.2、0、0.1、0.2 变化时, 图 2a 中所示  $f$  值, 即最右端下塌量增大, 且增大趋势较明显。因此, 深度方向间隙  $C1$  值对截面畸变值影响不大, 但会影响横向面的下塌量, 因此深度方向间隙定为 0 或者负向为宜。

$C2$  取 0.1 时, 与取 0.2 时相比, 回弹后空间最大扭转值较小些。

#### 3.3.2 间隙不对称时 (见表 3)

试验号 1~6 中, 型材最小厚度均在 5.894mm, 对厚度影响不大。

间隙不对称时模拟所得回弹后的空间扭转量  $w$  要小于间隙对称时。

#### 3.3.3 小结

通过比较截面畸变和回弹量, 同时考虑 1、2、3 节点的 4、5 节点的边的直线度, 综合以上模具间隙对称和不对称两种情况, 确定不对称间隙 L1R3 为最终模具结构。

表 2 间隙对称时组合设计表

试验号	$C1$	$C2$
1	-0.2	0.2
2	0	0.2
3	0.1	0.2
4	0.2	0.2
5	-0.2	0.1
6	0	0.1
7	0.1	0.1
8	0.2	0.1

表 3 间隙不对称时组合设计表

试验号	$L$	$R$
L1R5	0.1	0.5
L2R3	0.2	0.3
L1R3	0.1	0.3
L3R1	0.3	0.1
L3R3	0.3	0.3
L4R4	0.4	0.4

### 4 预拉及补拉量对成形结果的影响

4.1 预拉量的影响 (补拉不变 0.26%, 见图 4)

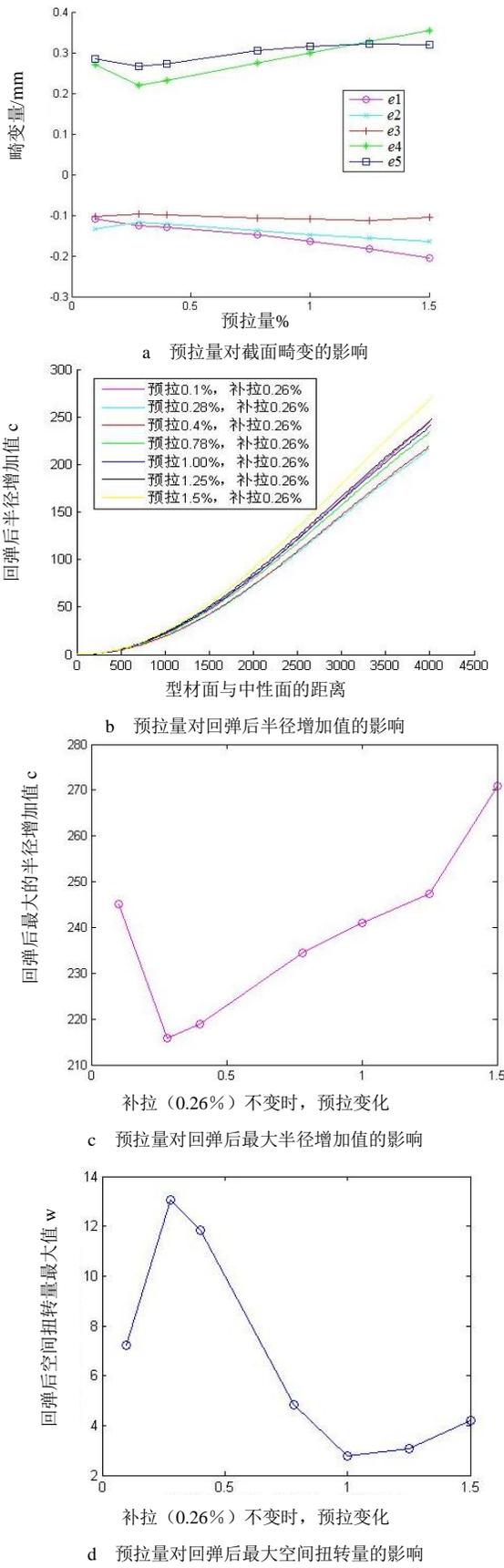


图 4 预拉量对成形精度的影响

4.2 补拉量的影响 (预拉不变 0.28%, 见图 5)

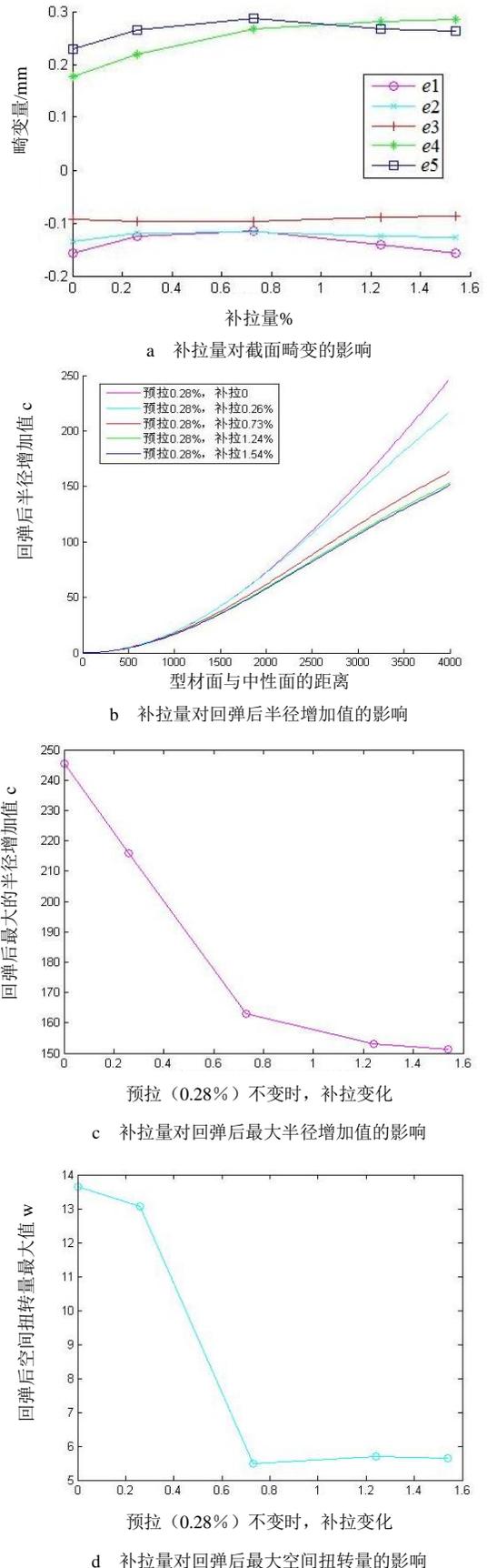


图 5 补拉量对成形精度的影响

### 4.3 小结

a. 预拉量增加, 图 2a 中  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_4$  的值均增大, 其中  $e_1$  变化最为明显。下缘偏转值  $e_3$ 、 $e_5$  受模具与型材间隙的限制, 不会超过所对应的间隙值。在分析截面畸变量随预拉、补拉的影响时, 主要考查  $e_1$ 、 $e_2$  和  $e_4$  的值。

b. 预拉量对回弹后半径增加值 (法向位移  $c$ ) 的影响不大, 对最大空间扭转量  $w$  的影响规律并不明显。

c. 补拉量对截面畸变的影响并不明显, 且小于预拉量对畸变的影响。

d. 补拉对回弹影响显著。随补拉增加, 最大半径增加值及最大空间扭转量可显著减小。但补拉大于 1.24% 后对扭转及半径增加值影响不大。

e. 综上, 确定预拉 0.78%, 补拉 1.24% 为最佳预拉-补拉值。

### 5 结束语

本文通过一系列数值模拟试验, 对图 1 中所示大尺寸复杂截面型材进行一系列数值模拟试验。确定最佳模具与型材间隙值为图 3b 所示不对称型, 且  $L=0.1$ ,  $R=0.3$ ; 并确定最佳预拉-补拉值为 0.78%, 1.24%。



(上接第 49 页)

$$\text{当 } Q_c = 9000 \text{ 时, } \frac{T_b}{T_\tau} < 2.1688 \times 10^{-4} Q_c = 1.9519,$$

$$\frac{T_b}{T_1'} < 0.9519;$$

$$\text{当 } Q_c = 10000 \text{ 时, } \frac{T_b}{T_\tau} < 2.1688 \times 10^{-4} Q_c = 2.1688,$$

$$\frac{T_b}{T_1'} < 1.1688;$$

从以上结果分析可知: 若磁控管腔体较大, 则可获得较大  $Q_c$ , 当腔体较小时,  $Q_c$  是不易做大的。对超小型磁控管腔  $Q_c$  值约在 10000 左右; 对小型磁控管腔  $Q_c$  值则会更高, 约在 10000 以上; 对极小型磁控管腔  $Q_c$  值可做在 5000 以上, 其贮存时间  $T_b$  与其它因素造成的弛豫时间  $T_1'$  满足的振荡条件可参看以上结果。总之贮存时间  $T_b$  不能过长, 否则对振荡也是不利的。对新设计的极小型磁控管腔只要满足  $\frac{T_b}{T_1'} < 0.0844$  和原子线宽  $\Delta\nu_0 < 0.81 \approx 1$  (Hz) 时, 在其它条件确定下, 就可以保证由腔牵引所引起的相对频移小于  $10^{-14}$  的数量级。

### 5 结束语

通过对影响微波腔频移的多普勒及腔牵引效应的分析可知, 对所设计的极小型氢频标微波腔来说, 在  $T=323K(50^\circ C)$  时, 将贮存泡温度变化控制在  $0.01^\circ C$  范围内, 多普勒相对频移可获得  $1.4 \times 10^{-15}$  的频率准确度; 当  $Q_c=5 \times 10^3$ , 为满足振荡条件, 保证腔牵引相对频移  $\frac{\delta\nu_c}{\nu} < 10^{-14}$ , 腔谐振频率与原子跃迁频率差值要小于 5Hz, 原子线宽要小于 1Hz。

### 参考文献

- 1 雒向东, 罗崇泰. 星载氢频标微波腔小型化研究综述[J]. 山东师范大学学报, 2008, 23(4): 38~40
- 2 雒向东, 罗崇泰. 结构参数对小型氢频标磁控管微波腔谐振频率的影响[J]. 计量与测试技术, 2008, 35(7): 44~45
- 3 雒向东, 罗崇泰. 超小型氢频标磁控管微波腔的仿真设计[J]. 航天制造技术, 2008, 150(4): 24~27
- 4 雒向东, 罗崇泰. 小型氢频标磁控管微波腔与空腔性能的比较[J]. 甘肃科学学报, 2009, 21(1): 24~27
- 5 王义道, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986
- 6 Harry EP. Small, very small, and extremely small hydrogen masers. IEEE International Frequency Control Symp.: 469~476