

# 铝合金板冲压成形 Benchmark 试验与有限元仿真<sup>\*</sup>

闫康康<sup>1</sup> 胡平<sup>1,2</sup> 郭威<sup>3</sup>

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025; 2. 大连理工大学汽车工程学院, 大连 116024;

3. 吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130025)

**【摘要】** 采用 NUMISHEET2002 会议提出的杯形件拉深 Benchmark 试验方案, 在不同压边力工况下, 对铝合金板 6111-T4 的拉深性能、各向异性行为、起皱缺陷进行了试验研究。研究表明: 各向异性系数小并未对铝合金板的成形性能产生较大影响, 通过增大压边力能有效解决起皱问题, 铝合金板 6111-T4 具有良好的冲压成形性能。基于自主研发的冲压成形 CAE 软件 KMAS 平台, 对 Benchmark 试验进行了仿真验证, 与试验结果对比表明: KMAS 软件采用的 Barlat-Lian 各向异性屈服准则和动力半显式算法能够准确模拟铝合金板的冲压成形。

**关键词:** 铝合金板 冲压成形 Benchmark 试验 有限元 仿真

**中图分类号:** TP391.9; TG386

**文献标识码:** A

## Benchmark Test and FEM Simulation of Aluminum Alloy Sheet Forming

Yan Kangkang<sup>1</sup> Hu Ping<sup>1,2</sup> Guo Wei<sup>3</sup>

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

3. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

Adopting the Benchmark test scheme of a cylindrical cup deep drawing proposed by NUMISHEET2002, the deep draw ability, anisotropic behavior and wrinkling of aluminum alloy 6111-T4 sheet were researched under different blank holder force (BHF) conditions. The results show that the formability of aluminum alloy sheet is hardly influenced by small anisotropic coefficient, and wrinkling can be eliminated effectively by increasing BHF, therefore aluminum alloy 6111-T4 sheet has excellent stamping formability. Based on the platform of KMAS, self-developed sheet metal forming CAE software, Benchmark test was simulated, and the results were compared with that of the test. KMAS software, adopting Barlat-Lian anisotropic yield criteria and dynamic semi-explicit algorithm, is able to simulate aluminum alloy sheet forming accurately.

**Key words** Aluminum alloy sheet, Sheet metal forming, Benchmark test, Finite element method, Simulation

### 引言

随着汽车产量和保有量逐年增加, 节约能源、减少环境污染成为世界汽车工业亟待解决的两大问题。汽车轻量化是降低燃油消耗和减少排放污染的

重要途径。世界铝业协会报告指出: 汽车质量每下降 10%, 油耗下降 8%, 尾气排放下降 4%<sup>[1~3]</sup>。

汽车车身质量约占汽车总质量的 40%, 车身的轻量化对于整车的轻量化有着举足轻重的作用。能达到同样力学性能指标的铝合金板(后简称铝板)比

收稿日期: 2008-10-10 修回日期: 2008-11-10

<sup>\*</sup> 国家杰出青年科学基金资助项目(10125208)和国家汽车电子产业化重大专项(2004-2563)

**作者简介:** 闫康康, 博士生, 主要从事车身数字化设计与制造技术研究, E-mail: yankangkang@gmail.com

**通讯作者:** 郭威, 教授, 主要从事冲压成形模具 CAD/CAE/CAM 一体化研究, E-mail: guowei@jlu.edu.cn

钢板轻 60%，能承受同样冲击的铝板比钢板多吸收 50% 的冲击能量，并且铝板的耐腐蚀性能优于钢板。用铝板代替钢板制造车身是世界各国汽车制造商实现轻量化的主要措施<sup>[4]</sup>。

由于铝属于面心立方晶体结构，而钢属于体心立方晶体结构，所以铝板和钢板的冲压成形性能存在本质上的差异，主要表现在铝板的总延伸率较钢板低，特别是局部延伸率，各向异性系数小 ( $r < 1.0$ )，弹性模量只有钢板的 1/3，铝板冲压时材料流动难以控制，应力和应变分布不均，容易产生破裂、起皱、回弹等缺陷，成形精度难以控制。由此，铝板冲压成形理论和技术的研究成为国际学术研究的热点<sup>[5-7]</sup>。

本文基于 NUMISHEET2002 会议提出的圆柱杯形件拉深 Benchmark 试验方案，在不同压边力下对铝板进行拉深试验，采用试验和有限元仿真对比的方法，研究铝板的拉深性能、各向异性行为，揭示压边力对起皱的影响规律，验证 KMAS 软件对铝板冲压成形进行有限元仿真的精度。

### 1 试验

#### 1.1 试验方法

采用 NUMISHEET2002 会议提出的圆柱杯形件拉深 (deep drawing of cylindrical cup) Benchmark 试验方案<sup>[8]</sup>。冲压试验模具、板料尺寸和结构如图 1 所示，试验液压机如图 2 所示。所有工具 (凹模、凸模、压边圈) 选用硬质工具钢 SKD11，工具表面进行热处理，模具表面粗糙度小于  $5 \mu\text{m}$  ( $R_a < 5 \mu\text{m}$ )。试验时液压机冲头速度  $20 \text{ mm/s}$ ，冲头行程  $40 \text{ mm}$ ，润滑剂采用 FD-1500 拉延油。

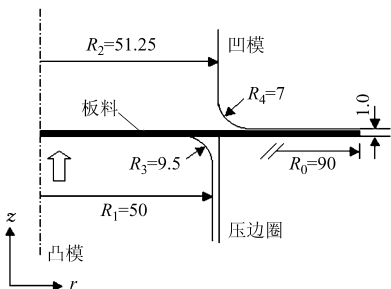


图 1 模具和板料几何尺寸 (单位: mm)

Fig. 1 Geometrical dimension of the tool and blank (mm)

#### 1.2 试验材料

试验板料采用美国铝业公司 (ALCOA) 生产的厚度  $1.0 \text{ mm}$  铝板 6111-T4，用激光切割成直径  $R_0$  为  $90.0 \text{ mm}$  的圆形坯料，铝板力学性能参数如表 1 所示。

#### 1.3 试验方案

分别取压边力为  $10 \text{ kN}$  和  $50 \text{ kN}$  进行两组试

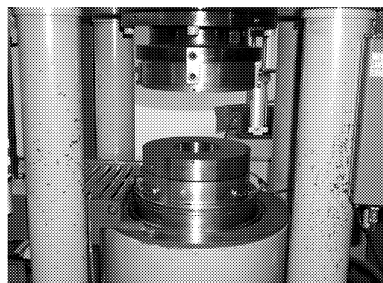


图 2 试验液压机及模具

Fig. 2 Press machine and tool of experiment

表 1 试验铝板力学性能参数

Tab. 1 Aluminum alloy sheet mechanical property parameters

屈服应力 $\sigma_s/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	硬化指数 $n$	强化系数 $K/\text{MPa}$	各向异性系数 $r$
181.24	70.5	0.34	0.228	539.29	0.694

验，每组做 3 个试样，试验结果取测量数据平均值。

### 2 有限元仿真

应用吉林大学自主研发的冲压成形有限元仿真软件 KMAS (king-mesh analysis system) 进行铝板拉深成形有限元仿真。

#### 2.1 KMAS 主要算法特点

(1) 采用 Mindlin 板壳单元理论，四结点等参单元模型，共旋坐标理论，建立了可考虑横向剪切应变的适合于金属板材冲压成形数值模拟的 BT 壳单元有限元数学模型。

(2) 采用具有微观物理基础的 Barlat-Lian 各向异性屈服准则<sup>[9]</sup>，对于面心立方金属  $M$  取 8，这样可以有效模拟塑性各向异性导致的突缘制耳。

$$f = a |K_1 + K_2|^M + a |K_1 - K_2|^M + c |2K_2|^M - 2\bar{\sigma}^M = 0$$

其中 
$$K_1 = \frac{1}{2} (\sigma_{11} + h\sigma_{22})$$

$$K_2 = \sqrt{K_1^2 + p^2 \tau_{12}^2} \quad c = 2 - a$$

式中  $a, h, p$ ——材料常数

$M$ ——屈服函数指数

$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \tau_{12}$ ——第一、第二主应力及剪应力

$\bar{\sigma}$ ——屈服应力

(3) 在动力显式中心差分算法的基础上，采用牛顿迭代法，提出了基于速度迭代的弹塑性大变形动力半显式算法<sup>[10]</sup>，并给出了迭代格式和收敛标准。采用该算法能明显提高加载过程的应力场精度，从而获得比单纯用动力显式算法模拟加载过程更精确的成形结果。

#### 2.2 仿真模型和工艺参数

按照试验模具几何参数建立有限元仿真模型如图 3 所示，仿真工艺参数和试验工艺参数一致。

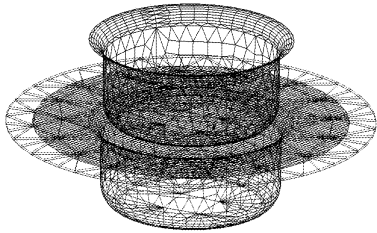


图3 有限元仿真模型

Fig.3 Finite element model

### 2.3 试验与仿真对比测试

(1)用凸模行至拉深下死点位置,沿与轧制方向成 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 方向截面上,圆柱杯中心到边缘的厚度变化曲线来评估铝板的拉深性能。

(2)用冲压力与凸模行程组合曲线来研究铝板冲压过程中的冲压力变化。

(3)用铝板拉深后法兰面外轮廓的几何形状(突缘制耳),来研究铝板在润滑条件下的各向异性行为,以及KMAS采用的Barlat-Lian屈服函数对铝板各向异性行为的仿真精度。

(4)用法兰面上皱褶的数量研究KMAS对起皱的预示精度以及压边力对铝板起皱的影响规律。

### 3 试验与仿真结果

用Pentium4-2.4GHz微机进行仿真计算,耗时998 s,占用内存73.56 MB。

#### 3.1 不同压边力铝板厚度分布

不同压边力下铝板厚度分布如图4~6所示。图4为沿轧制方向从圆柱杯中心到边缘截面厚度分布曲线,图5为与轧制方向成 $45^\circ$ 角的截面上厚度分布曲线,图6为与轧制方向成 $90^\circ$ 角的截面上厚度分布曲线。从图中可看出铝板厚度分布较均匀,减薄率较小。

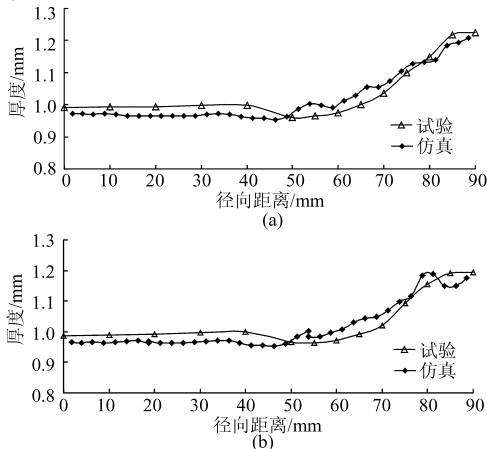
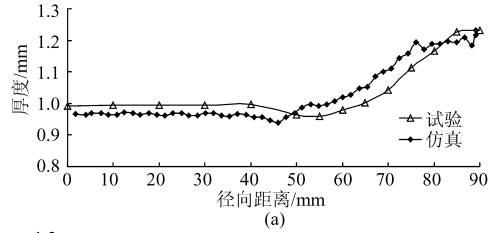


图4 沿轧制方向从圆柱杯中心到边缘截面厚度分布曲线

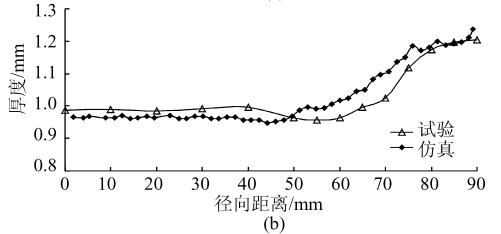
Fig.4 Thickness distribution cut at  $0^\circ$  from

RD(rolling direction)

(a) 压边力为 10 kN (b) 压边力为 50 kN



(a)

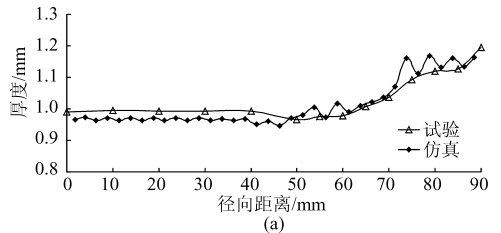


(b)

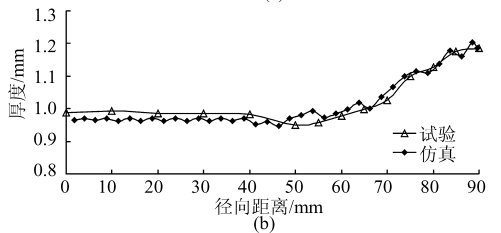
图5 与轧制方向成 $45^\circ$ 角的截面上厚度分布曲线

Fig.5 Thickness distribution cut at  $45^\circ$  from RD

(a) 压边力为 10 kN (b) 压边力为 50 kN



(a)



(b)

图6 与轧制方向成 $90^\circ$ 角的截面上厚度分布曲线

Fig.6 Thickness distribution cut at  $90^\circ$  from RD

(a) 压边力为 10 kN (b) 压边力为 50 kN

#### 3.2 不同压边力下成形时冲压力对比

不同压边力成形时冲压力对比如图7所示。

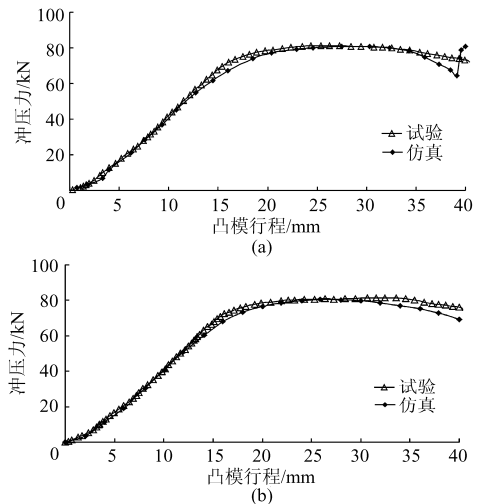


图7 冲压力与凸模行程曲线

Fig.7 Punch force (kN) vs punch displacement

(a) 压边力为 10 kN (b) 压边力为 50 kN

### 3.3 铝板成形时表现出的各向异性

因为制件中心对称, KMAS 仿真只测量一半的法兰面外缘几何形状数据, 测量结果如图 8 所示, 其压边力为 50 kN。由于铝板的各向异性特性, 制件法兰面外边缘呈波浪形状, 试验和仿真铝板突缘均产生 4 个制耳。

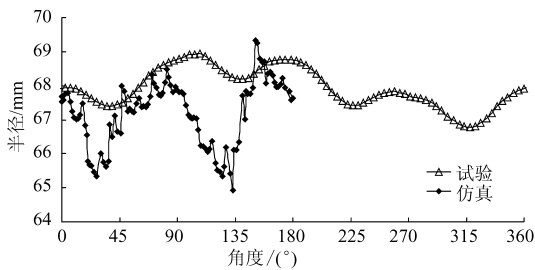


图 8 从制件中心到边缘长度沿圆周方向展开分布图

Fig.8 Outer profile as a function of  $\theta$  starting from RD

### 3.4 铝板成形时起皱情况对比

当压边力取 10 kN 时, 铝板拉深后在法兰面上产生皱褶, 皱褶数量表示起皱缺陷的严重程度。图 9 表示压料面上产生皱褶数量试验与仿真结果对比, 其中 KMAS、Dynaform、Pam-Stamp 等表示应用此软件的仿真结果。对于压边力为 50 kN 的工况, 试验和仿真结果均没有产生起皱缺陷。

## 4 结论

(1) 铝板各向异性系数小对其拉深性能影响较

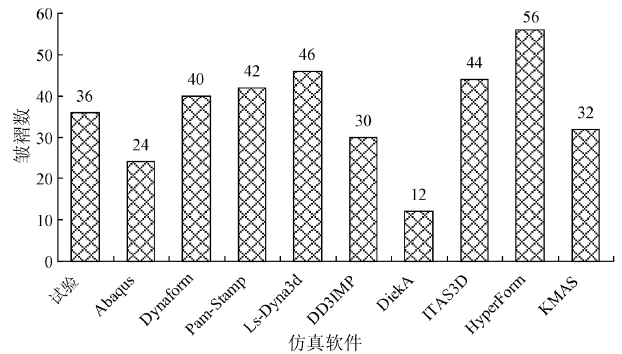


图 9 铝板拉深后法兰面上起皱数量对比图

Fig.9 Number of wrinkling waves at the flange of Al alloy

小, 铝板 6111-T4 具有较好的拉深性能, 可用于制造汽车车身冲压件。

(2) 高压边力工况下, 铝板 6111-T4 在与轧制方向成  $0^\circ$  和  $90^\circ$  两个方向突缘产生制耳, 沿与轧制方向成  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向比成  $45^\circ$  方向表现出更强的各向异性。

(3) 低压边力工况下, 铝板比较容易起皱, 在实际生产中可以通过增大压边力消除起皱缺陷。

(4) KMAS 软件采用的 Barlat-Lian 屈服准则和动力半显式算法能够准确模拟铝板冲压成形的减薄程度、冲压力分布、各向异性、起皱等情况, 可用于指导冲压模具设计。

## 参 考 文 献

- 1 Miller W S, Zhuang L, Bottema J, et al. Recent development in aluminum alloys for the automotive industry[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280(1): 37~49.
- 2 Morita A. Aluminum alloys for automobile applications[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA6), Toyohashi; Japan Institute of Light Metals, 1998, 1:25~32.
- 3 Benedyk J C. Light metals in automotive applications[J]. Light Metal Age, 2000, 10(1): 34~35.
- 4 Hopf B, Birmans C. Lightweight body current status and future challenges[C]//Chinese-German Ultralight Symposium, Beijing, 2001: 201~207.
- 5 Merklein M, Geiger M. New materials and production technologies for innovative lightweight constructions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125~126(9): 532~536.
- 6 Halil Ibrahim Demirci, Cemal Esner, Mustafa Yasar. Effect of the blank holder force on drawing of aluminum alloy square cup: theoretical and experimental investigation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206(1~3):152~160.
- 7 赵茂俞, 薛克敏, 李萍. 多元非线性回归的铝合金覆盖件成形模拟优化设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9):166~169. Zhao Maoyu, Xue Kemin, Li Ping. Numerical simulation and optimization of aluminum alloy auto panel forming by multivariate nonlinear regressing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 166~169. (in Chinese)
- 8 Dong Yol Yang, Soo Ik Oh, Hoon Huh, et al. Benchmark problems and results[C]//NUMISHEET2002, Korea, 2002, 2: 677~681.
- 9 Barlat F, Lian J. Plasticity behavior and stretchability of sheet metals. part I: a yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions [J]. International Journal of Plasticity, 1989, 5(1):51~66.
- 10 申国哲, 胡平, 王锦程. 改进的速度迭代弹塑性大变形成动力半显式算法[J]. 固体力学学报, 2003, 24(4):463~468. Shen Guozhe, Hu Ping, Wang Jincheng. A modified elasto-plastic large deformable dynamic semi-explicit method based on the iteration of velocity[J]. Aata Mechanica Solida Sinica, 2003, 24(4): 463~468. (in Chinese)