

# 板料渐进成形极限图测试方法研究

王 进<sup>1,2</sup>, 姜虎森<sup>1</sup>, 陶 龙<sup>1</sup>, 王宝平<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 华中科技大学 模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 成形极限图是判断板料成形中是否会发生失效的重要依据。渐进成形中的板料成形极限图和传统冲压成形极限图有显著不同。板料传统冲压成形极限图测试方法已较为完善, 而对于渐进成形尚没有形成统一的标准。本文在已有的测试方法基础上, 提出了通过渐进成形圆弧沟槽、十字交叉圆弧沟槽直至板料端部破裂后, 测量破裂位置最大和最小主应变以获得板料渐进成形极限图的新方法。通过数值模拟研究, 分析了采用该方法对板料进行渐进成形时板料局部的应变状态, 表明该方法可行; 并使用该方法得了 0.9 mm 厚工业纯铝 1060 板料的渐进成形极限图。

**关键词:** 板料成形; 渐进成形; 成形极限图; 加工轨迹

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3940.2013.02.009

中图分类号: TG302 文献标识码: A 文章编号: 1000-3940 (2013) 02-0034-04

## Study on experimental method of measuring forming limit diagram in incremental sheet forming

WANG Jin<sup>1,2</sup>, JIANG Hu-sen<sup>1</sup>, TAO Long<sup>1</sup>, WANG Bao-ping<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

2. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430047, China)

**Abstract:** Forming limit diagram (FLD) is an effective method to estimate sheet crack in sheet forming. There are obviously differences between the conventional FLD and incremental sheet forming (ISF) FLD. The method of measuring the conventional FLD of sheet has been standardized. But there is inconsistent on measuring the ISF FLD until now. A new experiment method of measuring the ISF FLD was proposed. An arc groove and a cross arc groove on a sheet metal were formed to crack respectively, and major and minor strain at the crack location were measured to establish the ISF FLD. Numerical simulation was employed to learn the strain states in forming the two grooves, and the results show that the new method is feasible. Based on the method, the ISF FLD of an industrial pure aluminum 1060 with the thickness of 0.9 mm was obtained.

**Keywords:** sheet forming; incremental sheet forming; forming limit diagram; tool path

与传统板料冲压成形相比, 数控渐进成形不需要模具或只需要凸模, 借助工件 CAD 模型能够快速完成零件的成形, 特别适合新产品开发以及单件或小批量钣金零件的生产。此外, 渐进成形还具有花费低、成形力小、板料成形能力高等优点。该成形方法在诸多制造行业具有广泛的应用前景, 得到了越来越多的关注和研究<sup>[1-5]</sup>。

成形极限图 FLD 是判断板料成形中是否发生失效的主要依据。很多实验已经证明, 渐进成形中板料的 FLD 和传统冲压中有显著的不同, 成形极限曲

线 FLC 为在最小主应变-最大主应变坐标系中第一象限内的负斜率方向上, 由平面应变单向拉伸状态向等双向拉伸状态过渡的一条直线, 且位置比传统冲压的 FLC 位置高很多<sup>[6]</sup>。板料传统冲压成形极限图的测试方法已较为完善, 而对于板料渐进成形的 FLD 测试, 不同学者给出了不同的方法。Kim 和 Park<sup>[6]</sup> 建议使用直沟槽法估计板料渐进成形的 FLC, 使用此方法获得 FLC 斜率为 -1。Filice<sup>[7]</sup> 提出采用螺旋加工路径加工截头圆锥, 通过选择一组合适的成形参数可以获得从平面应变单向拉伸状态向双向拉伸状态过渡时破裂的应变, 从而获得 FLD。Martins 和 Silva 等<sup>[8-9]</sup> 基于膜假设, 提出一种解析计算获得板料渐进成形 FLC 斜率的方法, 由实验测试截头方盒成形时角部破裂的应变值, 可以得到 FLD。到目前为止, 板料渐进成形 FLD 的测试方法尚未形成统一的标准, 新的更为合理的测试

收稿日期: 2012-09-24; 修订日期: 2012-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51205217); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金资助项目 (2011-P07); 山东省高等学校科技计划资助项目 (J10LD13)

作者简介: 王 进 (1978-), 男, 博士, 副教授

电子信箱: jinwangqtech@163.com

方法尚有待提出。

本文在已有渐进成形 FLD 测试基础上提出一种新方法，采用数值模拟分析在成形过程中板料局部位置的应变状态，确定该方法是否能够获得 FLD 测试所需要的不同应变状态。并采用该方法测试以获得 0.9 mm 厚工业纯铝 1060 板料的渐进成形 FLD。

## 1 板料渐进成形 FLD 测试新方法

### 1.1 测试新方法原理

为了获得板料渐进成形 FLD，需要测试不同应变状态板料破裂的位置。为了获得不同的应变状态，设计图 1 为工具成形轨迹。图 1a 中将板料固定在 X-Y 平面处，工具在垂直板料的 Y-Z 平面以往复圆弧轨迹进行运动，成形圆弧沟槽，直至板料发生破裂终止。由于每一加工层中，圆弧的最下端变形量最大，破裂位置会出现在最下端位置。且板料在最下端局部所受拉伸沿工具运动方向远小于垂直拉伸方向，该处的应变状态接近单向平面应变拉伸状态。图 1b 为获得双向拉伸应变状态而编制的工具的运动轨迹，将板料固定在 X-Y 平面处，工具在垂直板料的 Y-Z 平面和 X-Z 平面交替以往复圆弧轨迹进行运动，成形十字交叉圆弧沟槽，直至板料发生破裂终止。成形中，板料最下端受到双向拉伸变形，接近等双向拉伸状态。分别测试两组实验中板料端部位置破裂处的最大和最小等效应变，可以获得板料渐进成形 FLD。

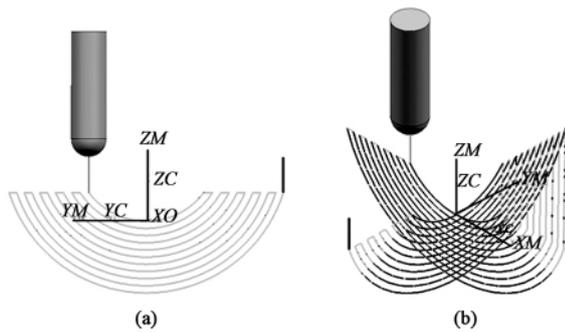


图 1 FLD 测试工具运动轨迹

(a) 圆弧沟槽 (b) 十字交叉圆弧沟槽

Fig 1 Tool trace in FLD experiments

(a) Arc groove (b) Cross arc groove

### 1.2 数值模拟研究

对本文所提出的测试方法进行相应的数值模拟，模型初始网格划分如图 2 所示，半球头工具直径为  $\Phi 10$  mm。正方形板料厚度为 0.9 mm，边长为 140 mm  $\times$  140 mm 正方形板料。压料板边长为 140 mm  $\times$  140 mm，中心开直径为  $\Phi 100$  mm 圆孔。工具加工

程序采用 UG NX7.0 编制，经输出转换处理后加载到商用有限元软件 Dynaform 中。数值模拟中，工具虚拟速度为  $5000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。板料为工业纯铝 1060，杨氏模量为 55.94 MPa，泊松比为 0.3，应力-应变关系如式 (1) 所示<sup>[10]</sup>。设置加工工具与板料、板料与压料板、板料与支撑板之间摩擦系数均为 0.12。计算过程中设置网格重划分以保证能够顺利求解。

$$\sigma = 197.75e^{0.12} \quad (1)$$

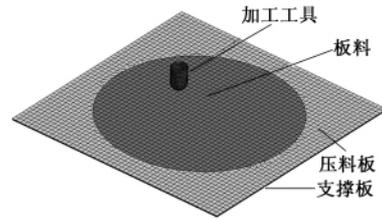


图 2 数值模拟网格划分

Fig 2 Mesh in simulation

### 1.3 实验过程

与数值模拟相对应厚度为 0.9 mm 的 1060 工业纯铝板用于 FLD 测试实验，板料、压料板形状和尺寸均与数值模拟中相同，加工中层间距为 0.2 mm，进给速度为  $800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，采用 40# 机油润滑。分别成形半径为 40 mm 的圆弧沟槽和十字交叉圆弧沟槽直至板料出现破裂为止。板料成形前，均采用电蚀法在板料加工反面印制直径为 2 mm 的圆形网格，用于测量应变量。

## 2 结果及讨论

### 2.1 数值模拟结果

图 3 为圆弧沟槽渐进成形数值模拟结果，成形中当中心位置最大主应变  $\epsilon_{\max}$  为 0.71 时，最小主应变  $\epsilon_{\min}$  为 0.15， $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min} = 4.73$ ， $\epsilon_{\min}$  远小于  $\epsilon_{\max}$ ，接近平面应变单向拉伸应变状态。图 4 所示为十字交叉圆弧沟槽渐进成形数值模拟结果，成形中当中心位置最大主应变  $\epsilon_{\max}$  为 0.66 时，最小主应变  $\epsilon_{\min}$  为 0.45， $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min} = 1.46$ ，接近等双向拉伸应变状态。分别从两个模型成形端部选择如图 5 所示的单元，选择单元对应的最大和最小主应变如图 6 所示，可见数值模拟获得的应变状态和理想情况存在一定偏差，这主要是由于加工工具直径以及加工路径的影响。数值模拟结果表明新测试方法可以近似获得板料渐进成形极限测试所需要的平面应变单向拉伸应变状态和双向拉伸应变状态。

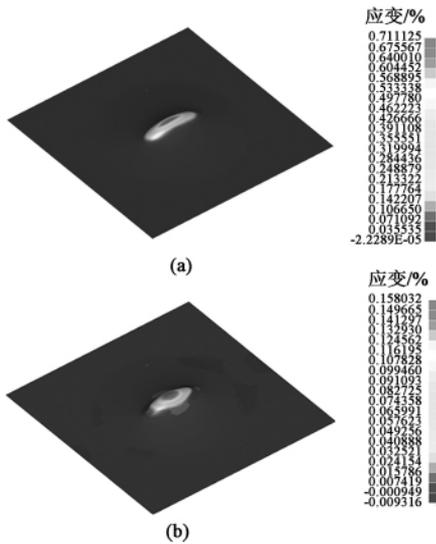


图 3 圆弧沟槽渐进成形数值模拟结果

(a) 最大主应变 (b) 最小主应变

Fig 3 Results of simulation of processing arc groove

(a) Major strain (b) Minor strain

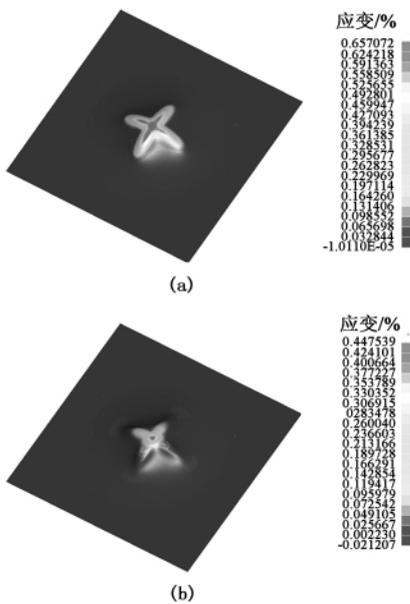


图 4 十字交叉圆弧沟槽渐进成形数值模拟结果

(a) 最大主应变 (b) 最小主应变

Fig 4 Results of simulation of processing cross arc groove

(a) Major strain (b) Minor strain

### 2.2 实验结果

图 7 所示分别为圆弧沟槽和十字交叉圆弧沟槽渐进成形实验结果，可见：圆弧沟槽工件表面初始圆形网格在端部破裂位置被拉伸成椭圆；十字交叉圆弧沟槽工件表面网格在端部破裂处被拉伸，形状仍接近圆形，半径显著增加。测试最大和最小主应变，获得工业纯铝 1060 渐进成形 FLC 如图 8 所示，可以采用式 (2) 方程表示：

$$\epsilon_{\max} + 0.72\epsilon_{\min} = 1.144 \quad (2)$$

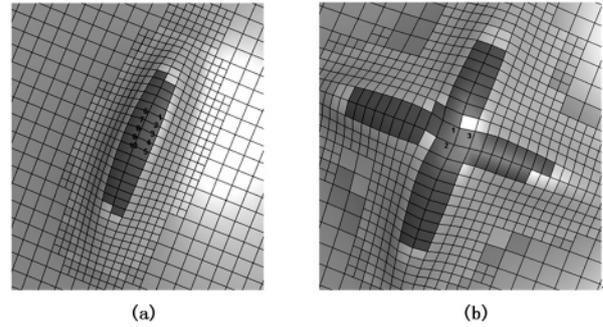


图 5 端部单元的选择

(a) 圆弧沟槽 (b) 十字交叉圆弧沟槽

Fig 5 Selected elements

(a) Arc groove (b) Cross arc groove

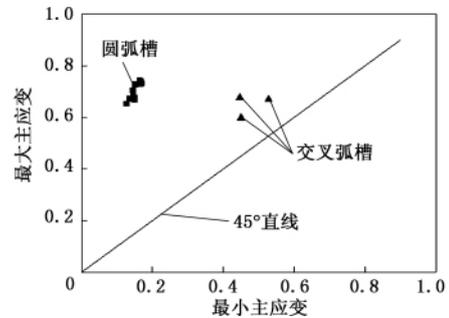


图 6 端部单元所处的应变状态

Fig 6 Strain states of selected elements

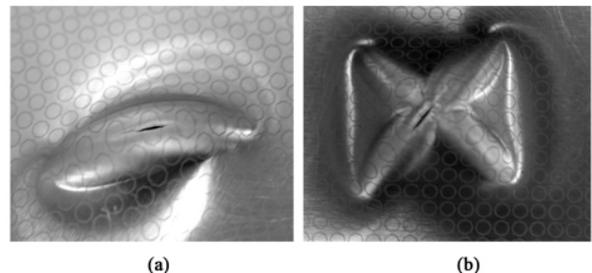


图 7 实验结果

(a) 圆弧沟槽破裂位置 (b) 十字交叉圆弧沟槽破裂位置

Fig 7 Experimental results

(a) Crack in arc groove (b) Crack in cross arc groove

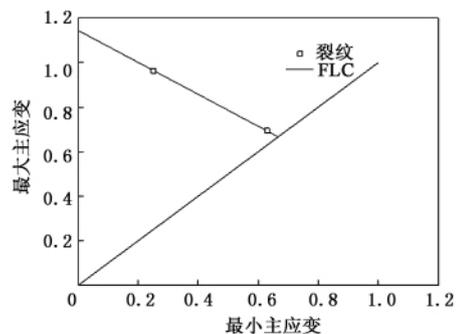


图 8 工业纯铝 1060 渐进成形 FLC

Fig 8 ISF FLC of 1060 Al

(下转第 39 页)

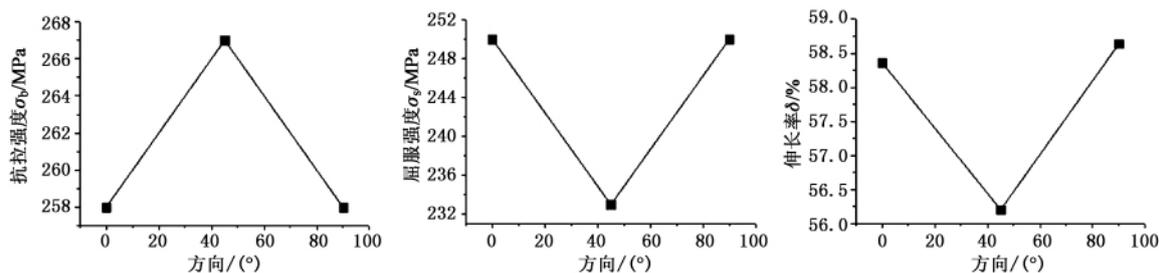


图3 轧制方向对材料成形性能的影响

Fig 3 Impact of material orientation to formability

有一定影响。在生产加工时,应确定材料的轧制方向,并在设计加工工序时,安排有利的加工方向。

#### 参考文献:

- [1] 林启中,林长华. 拉伸速度及试样对力学性能的影响 [J]. 物理测试, 1989, (7): 35.
- [2] 薛松,周杰,何应强. 差厚拼焊板成形性的单向拉伸试验 [J]. 锻压技术, 2011, 36 (2): 30-33.
- [3] GB/T 228-2002, 金属拉伸试验方法 [S].
- [4] 倪洪启,刘相华,王国栋. 超级钢板料冲压性能的拉伸试验研究 [J]. 材料科学与工艺, 2008, 16 (5): 702.
- [5] 丁富连,汪承璞,陈卓人. 冷轧薄钢板基本成形性能指标影响因素分析 [J]. 宝钢技术, 2000, (5): 40-44.
- [6] 吴向东,万敏,周贤宾. 各向异性板料屈服轨迹的研究 [J]. 材料科学与工艺, 2004, 12 (4): 391-397.
- [7] Sebastian Dziallach, Wolfgang Bleck, Michael Blumbach, et al. Sheet metal testing and flow curve determination under multiaxial conditions [J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9 (11): 987-994.
- [8] Durmus A. The effect of strain rate on mechanical properties of cold forming sheet metals [J]. Material Wissenschaft and Werkstofftechnik, 2009, 40 (9): 699-703.
- [9] 刘文静. 材料的机械性能对板料的成形性能的影响 [J]. 科学时代, 2009, (1): 84-86.
- [10] 王艳侠. 金属室温拉伸中拉伸速度对试验结果的影响 [J]. 机械管理与开发, 2010, 25 (5): 95-96.

(上接第36页)

### 3 结论

(1) 在已有渐进成形极限图测试方法的基础上,提出分别采用成形圆弧沟槽和十字交叉圆弧沟槽至破裂用于测试板料渐进成形极限图的方法。

(2) 数值模拟结果表明,圆弧沟槽渐进成形中,板料端部所处的变形状态接近平面应变单向拉伸状态;十字交叉圆弧沟槽渐进成形中,板料端部所处的变形状态接近等双向拉伸状态。

(3) 采用提出的新方法获得了0.9 mm厚工业纯铝1060板料渐进成形极限图。

#### 参考文献:

- [1] Echrif S B M, Hrairi M. Research and progress in incremental sheet forming processes [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26 (11): 1404-1414.
- [2] Jeswiet J. Metal forming progress since 2000 [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008, 1 (1): 2-17.
- [3] 肖冰,曹红锦,张志明,等. 国外金属板材单点渐进成形技术的新进展 [J]. 精密成形工程, 2010, (5): 38-40.
- [4] 莫健华,韩飞. 金属板材数字化渐进成形技术研究现状 [J]. 中国机械工程, 2008, (4): 491-497.
- [5] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54 (2): 88-114.
- [6] Kim Y H, Park J J. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, (130-131): 42-46.
- [7] Filice L, Fratini L, Micari F. Analysis of material formability in incremental forming [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51 (1): 199-202.
- [8] Martins P, Bay N, Skjoedt M, et al. Theory of single point incremental forming [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57 (1): 247-252.
- [9] Silva M, Skjoedt M, Atkins A G, et al. Single-point incremental forming and formability-failure diagrams [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2008, 43 (1): 15-35.
- [10] 高锦张. 板料数控渐进成形技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.