

开口型非对称薄壁型材拉弯成形数值模拟

郭 涛

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)



摘要: 基于动态显式算法的 ABAQUS/Explicit 分析模块对开口型非对称薄壁铝合金型材拉弯成形过程进行了数值模拟分析。研究发现: 通过内加填充物、合理的模具形状设计和较大的预拉值共同作用下, 能有效防止开口型非对称薄壁型材在拉弯过程中易出现的上缘塌陷和截面畸变的现象。

关键词: 开口型非对称薄壁型材; 拉弯成形; 截面畸变; 数值模拟

Digital Simulation of Stretch Bending on Open Asymmetric Thin-walled Profile

Guo Tao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100101)

Abstract: The analysis module of Abaqus/Explicit, based on Dynamic explicit algorithm, was adopted to simulate the stretch bending process on open asymmetric thin-walled aluminum alloy profile. The results show that the way of inner rubber support, proper die shape design and the bigger pre-stretch provide combined action to avoid the upper-side collapse and section distortion effectively during the stretch bending process on open asymmetric thin-walled aluminum alloy profile.

Key words: open asymmetric thin-walled profile; stretch bending; section distortion; digital simulation

1 引言

铝合金型材空间框架结构零部件数量少, 生产周期短, 全生命周期成本低, 与钢结构零部件相比可减重40%~50%^[1]。另外, 铝合金易于回收利用, 采用空间框架的车身结构能够很好满足抗撞击的安全性需求, 因此铝合金型材在航空航天和汽车行业中得到广泛应用^[2]。型材弯曲成形当中拉弯是主要的一种工艺方法, 在制造型材弯曲件方面广泛应用于航空、航天和汽车、轨道列车等行业^[3]。同时, 拉裂、起皱、截面畸变、回弹等成形缺陷在拉弯成形中也较易产生。特别是截面畸变更是板成形中的新问题, 各种开口型非对称薄壁型材还存在多个形式的纵向扭曲问题^[4], 导致产品质量受到影响, 甚至造成废品的结果, 影响拉弯产品的稳定生产。有效阻止或避免拉弯型材

截面畸变现象成为目前铝型材采用拉弯成形工艺的关键问题。

本论文基于动态显式算法的ABAQUS/Explicit分析模块对开口型非对称薄壁铝合金型材拉弯成形过程进行了数值模拟, 分析预拉值、内加填充物对型材完成拉弯后截面畸变的影响关系, 从而为拉弯成形模具合理设计和工艺提供理论依据和参考规范^[5~7]。

2 有限元建模

2.1 材料模型

模拟材料选用常见的商用铝合金材料 2024-M态, 假定材料为各向同性, 机械性能如表 1 所示, 图 1 为在 Instron 试验机上拉伸速度为 1mm/min 时获得的材料真实应力应变曲线, 可用式 (1) 的幂指数表

作者简介: 郭涛 (1972-), 博士, 锻压成形工艺与设备专业; 研究方向: 冲压成形技术、数值模拟。

收稿日期: 2013-11-10

示其弹塑性本构方程^[4]:

$$\begin{cases} \sigma = k\varepsilon^n & (\sigma \geq \sigma_{0.2}) \\ \sigma = E\varepsilon & (\varepsilon < \frac{\sigma_{0.2}}{E}) \end{cases} \quad (1)$$

表 1 2024-O 铝合金材料性能

密度 /g cm ⁻³	屈服强度 /MPa	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	硬化指数	泊松比
2.78	77	68.9	320.9	0.21	0.33

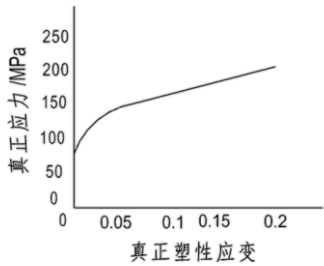


图 1 材料真实应力应变曲线

2.2 有限元数值模型

首先利用 ABAQUS/CAE 建立有限元数值模型，被拉弯成形的铝合金工件截面形状为开口型非对称薄壁型材，具体尺寸如图 2a 所示。

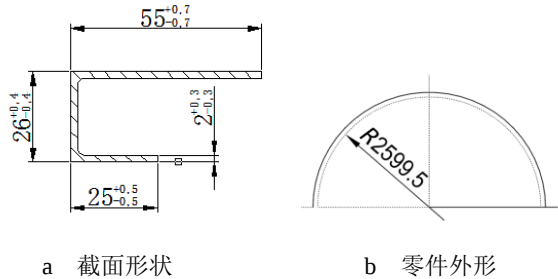


图 2 型材外形及截面尺寸

采用如图 3 所示的直进台面拉弯成形方式，加工成为如图 2b 所示的半圆弧形。由于拉弯成形的工件长 4000mm、壁厚为 2mm，因此选择可变形实体（Deformable）、壳单元（Shell）建立型材几何模型，型材截面尺寸上的过渡圆角半径为 2mm，考虑到有限元的特质，忽略型材的小圆角。由于对称，取 1/2 模型进行研究。采用 S4R 壳单元将型材进行离散化，截面一共由 23 个单元组成，其中上面长边 11 个单元，下面短边 6 个单元，侧面支撑边 6 个单元。沿长度方向 281 个单元。由于型材细长，故长度方向网格尺寸大些，截面方向上网格尺寸要小些，网格长度与宽度比值小于等于 4，以确保静态回弹收敛，厚度方向积分点定为 5 个。

夹钳和拉弯模具均作为拉弯工具处理，拉弯模具半径为 2598.5mm，弯曲角为 88°，拉弯模具只考虑与型材接触的部分，其他部分忽略；拉弯成形过程当中，定义为面面接触，主面为模具面，从面为型材下表面。

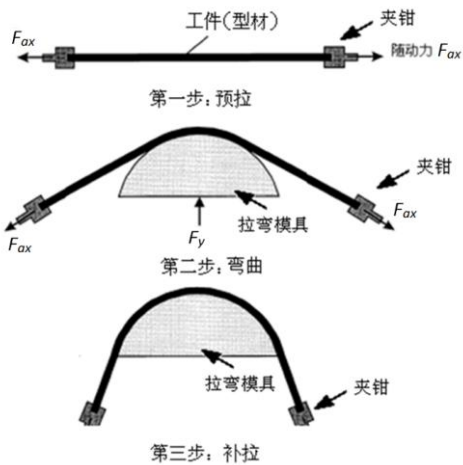


图 3 直进台面拉弯成形方式

夹钳的作用是带动型材移动拉弯与模具接触，并对型材施加载荷。为简化运动模型，在不影响夹钳作用的前提下，将夹钳与型材绑定（Tie）。为了实现夹钳的拉伸和弯曲动作，把参考点设置在型材刚性连接的夹钳拉力中心位置，在夹钳参考点上施加的力为随动力（Follow Force），可随着参考点的转动而转动。

规定夹钳进行弯曲动作时随动力不卸载，夹持端在弯曲平面内两个方向的自由度可补偿型材中性层内移引起的型材伸长。假定拉弯模具和夹钳为刚体，即拉伸和弯曲时不变形。这样模具与夹钳选择离散刚体（Discrete rigid）、壳体（Shell）建立模型。

通过 R3D4 单元离散化，按照库伦摩擦定律处理模具与型材间的摩擦接触，摩擦系数取为 $\mu=0.15$ 。为兼顾计算效率和模拟计算精度，预拉、补拉速度均取 400mm/s，转臂的运动速度为 0.803rad/s。有限元数值模型如图 4 所示。

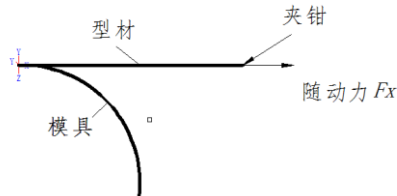


图 4 ABAQUS 数值模型示意图

2.3 数值模拟加载条件

零件采用三步成形工序（预拉-弯曲-补拉）的拉弯成形方式，如图3所示，首先开始预拉，设 δ 为预拉值，表示工件（型材）预拉前后的纵向长度比值。在数值模拟时，通过控制夹钳的位移量 U_z 的大小来实现；然后弯曲变形，由于工件（型材）截面为开口，而且纵向尺寸跨度很大，因此弯曲时易发生严重的截面上缘塌陷和回弹后扭曲变形，为衡量截面上缘塌陷的严重程度，用塌陷度 V 来定量表示，如图5所示，反映了弯曲变形后截面上缘中性层偏离原始中性层的距离；最后通过补拉纠正回弹达到用户所要求的最终形状。

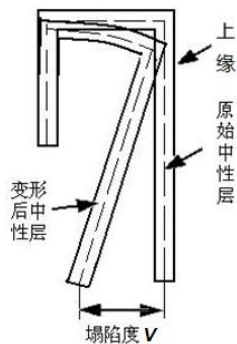


图5 截面畸变示意图

在上述的三步成形工序中，预拉值 δ 的大小直接影响后续的弯曲成形时的开口型非对称薄壁型材上缘塌陷的程度。因此，拟采用三种预拉值 δ 进行开口型非对称薄壁型材的拉弯成形，比较其上缘塌陷的严重程度，如表2所示。

表2 加载参数

	编号	预拉值 $\delta/\%$	位移量 U_z/mm	随动力 F/N
加载 路径	A	0	0.01	15708
	B	0.3	12	19274
	C	0.5	20	21717

为解决大尺寸开口薄壁型材在弯曲过程中截面畸变严重现象，防止上缘塌陷，模具设计如图6所示。

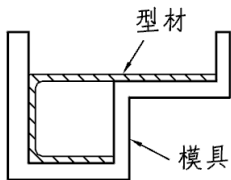


图6 模具设计

同时，在型材内加入PVC硬塑料弹性体，以阻止型材截面畸变的产生。有限元模型如图7所示。

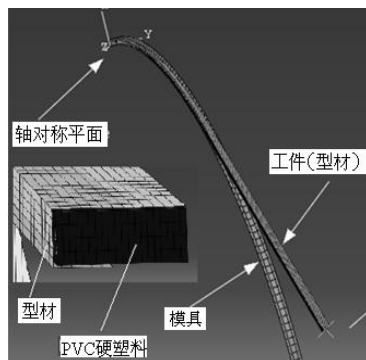


图7 有限元模型

3 模拟结果及分析

图8为ABAQUS软件模拟不同阶段的型材弯曲形貌，可以发现，在整个变形阶段施加在夹钳参考点上的随动力满足成形需求。

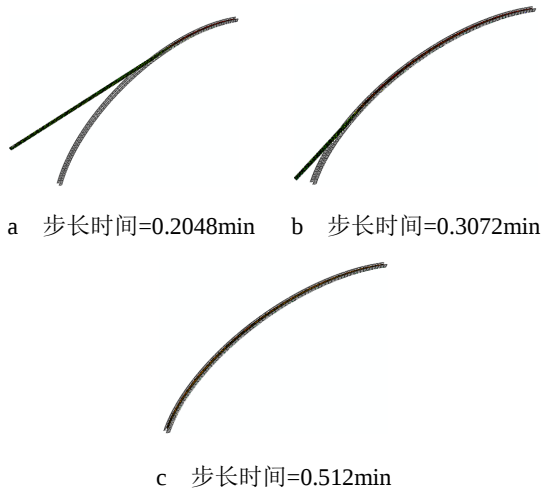


图8 不同模拟时段的工件（型材）成形形态

图9为预拉值 δ 为0.5%时的型材弯曲结束时的等效应力分布图，其中图9a为工件（型材）不带弹性体，图9b则为工件（型材）内带弹性体。从图中可以看到，不带弹性体的成形工件的最大等效应力为155.9MPa，另外，从等效应力值标识图中也可以看见：至中间标识区的等效应力为80MPa，这时等效应力已经大于材料的屈服强度77MPa。这就意味着图中的区域已经进入塑性变形阶段。不仅如此，横截面的中性层的形状揭示拉弯成形时产生了严重上缘塌陷现象。从图9b则可看到工件（型材）内带弹性体时的最大等效应力为171.5MPa，大于不带弹性体时的等效应力。

力,说明带弹性体后增大了材料的变形难度,使得变形力增大。此外也发现最大应力区域没有集中在型材中部,而是出现在夹钳附近。而且,横截面的中性层的形状的上缘塌陷程度较轻。

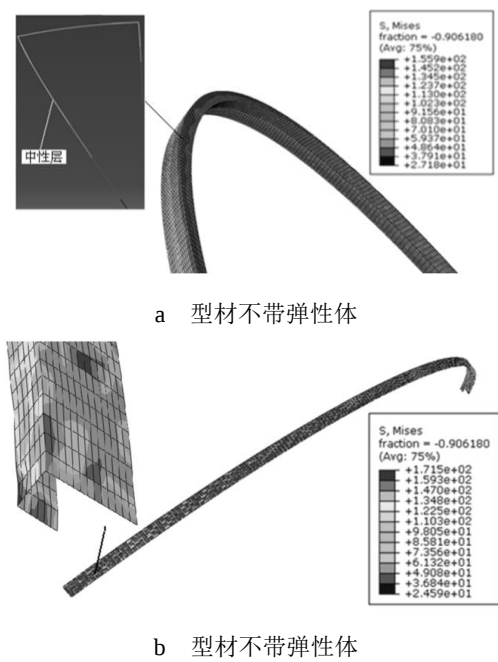


图 9 弯曲阶段结束时的等效应力图

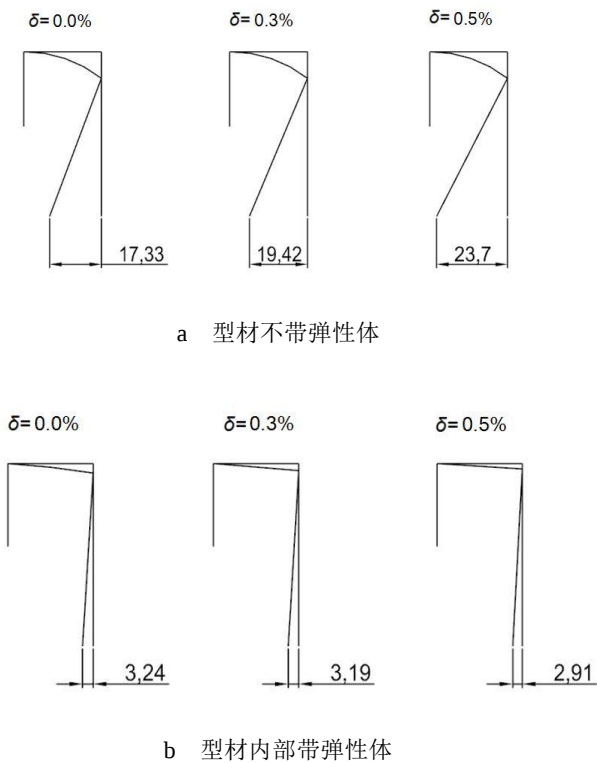


图 10 横截面塌陷度 V 形貌

图10为不同预拉值的横截面中性层塌陷度形貌,可以发现,不带弹性体的型材预拉值越大,其弯曲变形上缘塌陷度越大,即截面畸变越严重。但带弹性体的型材正相反,其预拉值越大,其弯曲变形上缘塌陷度越小,即截面畸变越轻。

4 结束语

基于ABAQUS软件模拟结果,可以发现:

- a. 在开口型非对称薄壁型材拉弯成形过程中,通过合理的模具设计和型材内加填充物的方法,有效地减小型材上缘面的塌陷,减轻或阻止型材截面畸变。
- b. 预拉值对于开口型非对称薄壁型材拉弯成形的上缘面的塌陷有直接的影响,对于不带填充物的型材而言,预拉值越大,型材上缘面的塌陷越严重,即型材截面畸变越严重;对于带填充物的型材而言,预拉值越大,型材上缘面的塌陷减轻,即截面畸变程度降低;这就是说,对于开口型非对称薄壁型材而言,要克服弯曲截面畸变现象,采用带填充物,并且在较大的预拉值条件下,可以有效阻止型材截面畸变。

参考文献

1 Miller J E, Bastard A H. On bend-strength forming of aluminum extrude tubes-I : experiments [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(5): 1283~1327

2 刁可山, 周贤宾, 李晓星, 等. 矩形截面型材拉弯成形[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 2(31): 134~137

3 刁可山. 铝合金型材拉弯成形研究进展[J]. 塑性工程学报, 2003, 10(6): 38~42

4 金朝海. 铝合金型材拉弯成形有限元仿真建模及成型过程模拟[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004

5 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): 391~393

6 鱼二强. 非对称型材拉弯成形的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2011 (15): 3476~3480

7 Hopperstad O S, Leira B J, Remseth S. Reliability-based analysis of a stretch-bending process for aluminum extrusions, Computers and Structures. 1999, (71): 63~75

