

文章编号:1000-582X(2011)07-046-05

两道次板材渐进成形过程仿真与实验验证

周 杰,胡建标,张 旭,李军超

(重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400044)

摘 要:针对渐进成形工艺加工侧壁较陡零件时板材厚度减薄严重的问题,通过建立基于 ABAQUS 的两道次板材渐进成形有限元模型,比较单道次与两道次成形路径下零件厚度分布和等效塑性应变历史变化规律,研究了两道次成形策略对板材成形极限的影响。结果显示,与单道次成形件相比,两道次成形件变形量最大的区域离零件底部更近,在所选 A、B、C 3 点处的等效塑性应变最大值分别减小了 66.2%、81.9% 和 36.0%,且板材变形更加均匀,使零件最小厚度增加了 16% 左右,表明两道次成形路径能大幅提高板材成形极限。经实验验证,数值模拟结果基本与实际吻合。

关键词:两道次渐进成形;板材成形;成形性能;工具轨迹

中图分类号: TG306

文献标志码: A

Numerical simulation and experimental investigation of double-stage sheet incremental forming

ZHOU Jie, HU Jian-biao, ZHANG Xu, LI Jun-chao

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In order to find a method to reduce excessive sheet thinning in the forming process of small half-apex angle parts by incremental sheet forming, a finite element model (FEM) for simulating double-stage process is developed in ABAQUS. Then, the simulation results, such as sheet thickness distribution and equivalent plastic strain history, are compared with those of single-stage simulation. The effects of double-stage on formability of sheet are discussed. The results show that using double-stage process instead of single-stage in forming parts, the maximum deformation is nearer to the parts' bottom surface, and the maximum equivalent plastic strain of node A, B, C is reduced by 66.2%, 81.9% and 36.0% respectively. The sheet thickness is better distributed, and the minimum thickness increases by 16%. In addition, double-stage incremental forming can greatly improve the formability of sheet. The simulation results are in a good agreement with experimental results.

Key words: double-stage incremental forming; sheet forming; formability; tool path

板材渐进成形工艺是通过数控系统驱动简单形状的工具头对板材进行连续局部塑性加工的过程,由于采用“切片”原理把三维零件离散成高度方向的众多等高层,故能成形形状非常复杂的制件^[1]。该

工艺特别适合小批量、多品种生产及快速原型制造,具有无需专用模具、柔性程度高、成形力小和能提高板材成形极限等优点,是一项非常有发展前景的板材成形新技术^[2]。

收稿日期:2011-03-30

基金项目:重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC 2009BA4065)

作者简介:周 杰(1966-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事板材 CAE 分析方面的研究;(Tel)023-65111493;
(E-mail)a65105410@cta.cq.cn.

但该工艺自 20 世纪 90 年代由松原茂夫^[3]提出至今,仍处于实验室研究状态,没有在工业生产中得到广泛应用,造成这一现象的最主要原因是该工艺成形任何一类板材,都受到最大成形半顶角的限制^[4-6],即当零件侧壁较陡,超过板材最大成形半顶角时,材料减薄将非常严重,致使零件容易破裂或强度满足不了使用要求^[6-7]。

近年来,许多学者在这方面已经做了大量工作,并普遍认为增加成形道次可大幅提高板材成形极限,如 Hirt 等^[6]通过对比不同应变路径对板材成形极限的影响,得出多道次加工能提高板材成形极限的结论;Kim 等^[8]认为两道次渐进成形加工可提高板材成形极限,并且根据剪切变形机理,推导出了确定预成形件形状的计算公式;Young 等^[9]用实验方法对比了单道次与两道次成形路径对板材厚度分布的影响,并用两次走刀的方式加工出了汽车排气管隔热罩,得出了两道次成形路径能减少板材过度变薄的结论;Iseki^[10]、周六如^[11]等使用多道次加工方法成功的加工出了直壁矩形件。

为预测多道次渐进成形过程的板材成形极限,数值模拟技术得到了越来越多的应用^[12],如 Dufloy 等^[13]通过建立局部有限元模型,研究了多道次成形策略,但由于数控渐进成形工艺并不存在任何建模的对称性,因此他们获得的结果与实际相差甚大。

受 CPU 计算时间的制约,笔者将建立两道次渐进成形过程的整体有限元模型,通过比较单道次与两道次渐进成形过程的数值模拟结果,分析不同应变路径下零件壁厚、应变分布的差异,从而研究两道次成形路径对板材成形极限的影响。最后还通过实验验证了有限元模型的有效性。

1 两道次成形分析

两道次渐进成形加工,可增大板材变形区域,使零件壁厚增加,避免破裂和强度不够的情形。

如图 1 所示是倾角为 θ_i 的零件,若一次成形完成,根据剪切变形机理^[14-15],板材最大主应变将为:

$$\epsilon_{\text{major}} = \ln \frac{L_1}{L_2} = \ln \sec \theta_i. \quad (1)$$

可见,倾角 θ_i 越大,最大主应变也越大;当 θ_i 趋近 90° 时,该零件将不可能一次成形。

采用两道次走刀加工,即先加工倾角为 θ_1 的零件,然后再成形倾角为 θ_i 的最终零件,此时板材最大主应变约为:

$$\epsilon_{\text{major}} = \ln \frac{L_1 + L_3}{L_2 + L_3} = \ln \left(\frac{\tan \theta_1}{\sin \theta_i} + 1 - \frac{\tan \theta_i}{\tan \theta_1} \right). \quad (2)$$

用式(1)减去式(2),得:

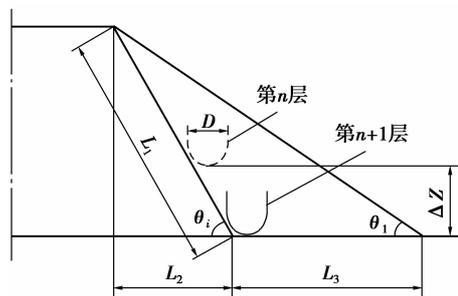


图 1 两道次加工

$$\ln \frac{L_1}{L_2} - \ln \frac{L_1 + L_3}{L_2 + L_3} = \ln \frac{L_1 L_2 + L_1 L_3}{L_1 L_2 + L_2 L_3}. \quad (3)$$

因 $L_1 > L_2$, 故式(3)大于零,即式(2)小于式(1)。从上面分析得知,一次性渐进成形会破裂或强度达不到要求的零件,可以尝试用两次或多次走刀的方式加工,以尽量减少材料变薄,使零件强度提高。

2 两道次渐进成形有限元模型

借助 ABAQUS 软件较好的非线性求解能力,以倾角 θ_i 等于 60° 、高度 30 mm 和底面半径 80 mm 的去顶圆锥件为研究对象,实现两道次渐进成形过程的仿真。控制板材最大主应变在 0.45 左右,根据式(2)计算,取预成形件倾角 θ_1 为 45° 。建模过程:建立预成形有限元模型,经计算获得应力、应变等数据后,把带有这些信息的结果网格导入终成形模型中,重新设置工艺参数、边界条件等,完成零件加工过程的模拟。

2.1 材料模型与工艺参数

模型中使用 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 DC56 钢板,采用 von Mises 屈服准则所描述的各向同性材料模型,具体参数见表 1 所示。

表 1 材料参数

名称	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850
泊松比	0.28
弹性模量/GPa	207
屈服强度/MPa	135.27
应变强化系数	0.23

影响渐进成形过程的主要工艺参数有成形倾角(θ)、球头直径(D)和下压量(ΔZ)等,它们的含义如图 1 所示。两道路数值模拟所用参数见表 2。为提高计算效率,模拟中将球头运动速度较验证实验增

加 60 倍,即预、终成形过程球头运动速度分别取为 1 m/s 和 1.5 m/s。

表 2 工艺参数

参数	预成形	终成形
成形倾角 $\theta/(\circ)$	45	60
球头直径 D/mm	16	10
下压量 $\Delta Z/\text{mm}$	1	0.5

2.2 有限元模型

为了简化求解过程和节省 CPU 计算时间,在不影响计算精度的前提下,除变形板材用壳单元建模外,其他相对刚度较大的工具均用离散刚体建模。图 2 是两道次预成形分析的有限元模型。

由于数控渐进成形工艺是通过球形工具头对板材进行连续局部塑性加工的过程,故网格不能划得太大,否则计算精度会受到影响,甚至可能使计算失败,因此在预成形阶段采用了局部网格细化技术对板材进行网格划分。根据经验,网格尺寸一般取球形工具头半径的 1/4 比较理想,因此在综合考虑球形工具头半径和下压量后,用 1.5 mm 对板材进行局部细化比较适宜,这样既可提高运算精度,又不会增加太多运算时间。另外,板材厚度方向选用 5 个 Gauss 积分点。

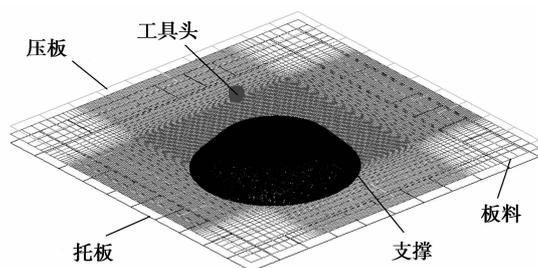


图 2 预成形有限元模型

采用库仑摩擦模型描述各工具与板材之间的摩擦关系。由于实际中成形工具头与板材之间润滑状态较好,因此在预成形和终成形有限元模型中,摩擦系数设为 0.1,采用一般接触算法;上、下压边圈及支撑与板材之间的摩擦系数设为 0.25,接触算法采用面-面接触。

3 数值模拟结果与分析

3.1 两道次渐进成形过程对板材厚度分布的影响

图 3 是分别模拟两道次和单道次渐进成形过程加工去顶圆锥件所得的板材厚度沿径向上的分布曲

线,其中单道次模拟所用成形工具头直径为 10 mm,下压量为 0.5 mm,与两道次中的终成形工艺参数相同。从图中可以看出,两道次成形件的最小厚度大于单道次成形件的最小厚度,分别为 0.58 mm 和 0.5 mm,增厚了 16%左右。然而,两道次成形件底部(即 AC 段)的厚度却要小于单道次成形件底部的厚度,说明两道次渐进成形策略是通过增加板材塑性变形范围来减小零件侧壁上的变形程度,从而使板材变形更加均匀,这符合体积不变原理。

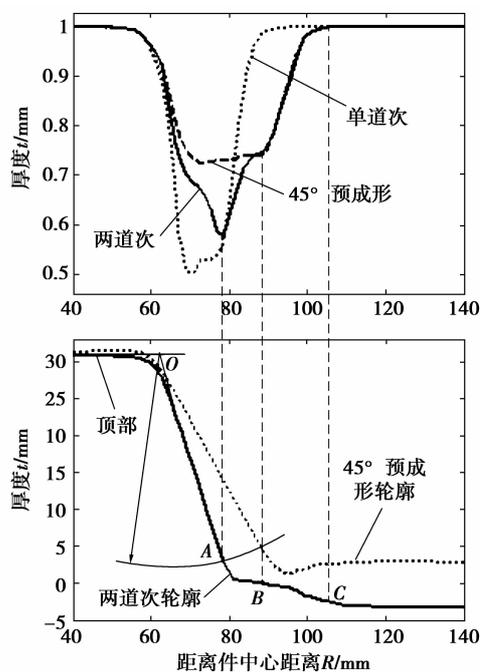


图 3 板材沿径向厚度分布与截面形状

另外,根据两道次成形件截面上的厚度变化,可将其划分为 3 个区域,即侧壁区、圆角区(AB 段)和变形辅助区(BC 段)。在侧壁区,板材厚度沿径向不断减薄,底部(点 A 处)厚度最小;圆角区厚度沿径向增加;变形辅助区与 45°预成形件对应区域的厚度相差不大,其作用主要是增大塑性变形区,使板材变形更加均匀,因此,一般不希望变形辅助区出现在零件的重要位置上。实际中可通过选择渐进成形方式来控制变形辅助区出现的位置,如法兰部位要求较高时,可采用无支撑的单点渐进成形方式加工,这样变形辅助区就在零件的顶部(见图 3);相反,若顶部要求较高,可选择有支撑的两点渐进成形方式加工,此时变形辅助区在零件法兰。

3.2 两道次渐进成形过程对应变历史的影响

如图 4 所示,A、B、C、D 是用于应变分析的 4 个取样节点,它们在高度方向的间距保持一致。

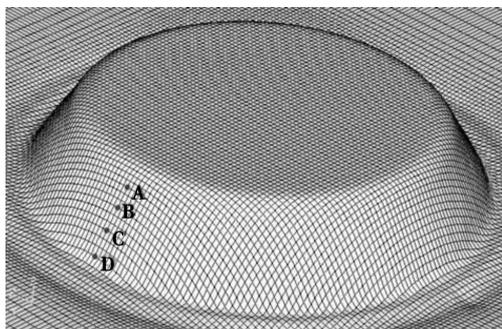


图 4 应变分析取样节点

图 5 是这些取样点在两道次与单道次成形路径下的等效塑性应变随时间的变化曲线。由图可知, 两道次成形路径下的曲线呈现两段阶梯形状, 这表明板材在每一道次都发生了局部塑性变形, 且第二道次的变形量要小于第一道次; A、B、C 3 点的等效塑性应变最大值在两道次成形路径情况下均小于单道次成形路径情况下的等效塑性应变最大值, 其中点 A 减小了 66.2%、点 B 减小了 81.9% 和点 C 减小了 36.0%, 对于点 D, 等效塑性应变最大值在两道次成形策略下并没有减小, 这说明两道次成形件变形量最大的区域在零件底部, 稍低于单道次成形件的变形量最大的区域。

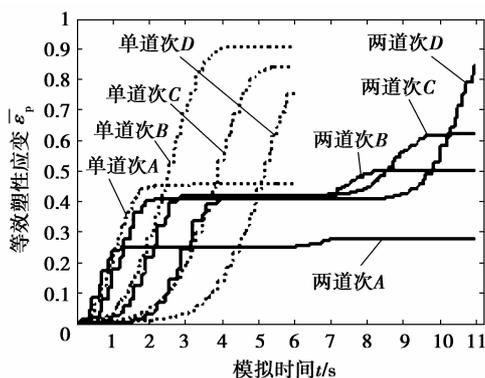


图 5 两道次与单道次渐进成形等效塑性应变比较

4 实验验证

根据渐进成形原理, 利用 3 轴数控铣床和如图 6 所示的专用压边装置完成倾角 θ_i 等于 60° 、高度 30 mm 和底面半径 80 mm 去顶圆锥件的两道次及单道次渐进成形实验。其中两道次预成形时工具头进给速度为 1 000 mm/min, 终成形及单道次成形时进给速度为 1 500 mm/min。板材与成形工具头之间用冲压用润滑油进行油池润滑。除此以外, 其他工艺参数均与数值模拟采用的参数相同。

为了确保实验与数值模拟所用工具头运动轨迹一致, 输入机床的 NC 代码和工具头位移加载数据是同时生成的。

图 7 为两道次终成形件实物照片, 其形状与用数值模拟方法得到的两道次终成形件形状非常相似 (见图 4)。图 8 和图 9 是两种成形路径下经实验测量和数值模拟方法得到的零件厚度沿径向的分布曲线, 从图中可以看出, 数值模拟成形件的厚度分布与实际零件厚度分布相吻合, 经计算, 两者误差不超过 5%, 因此可以证明上述有限元模型及结果分析的有效性。

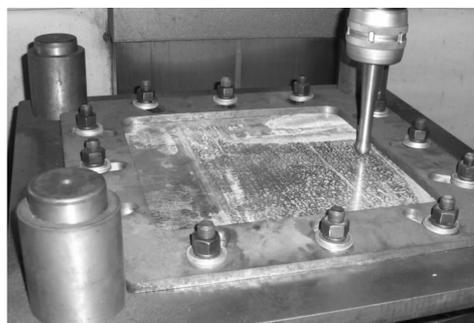


图 6 渐进成形压边装置和成形工具头



图 7 两道次渐进成形零件照片

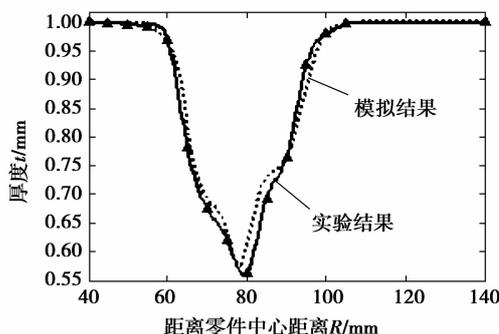


图 8 两道次成形数值模拟与实验结果对比

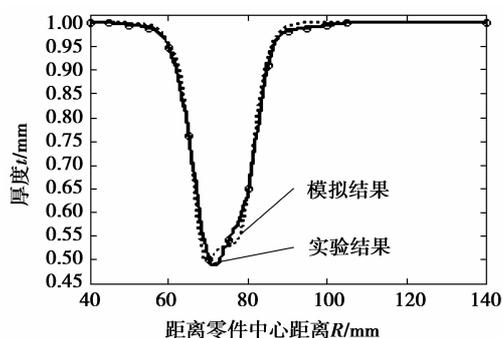


图9 单道次成形数值模拟与实验结果对比

5 结语

笔者建立了两道次渐进成形过程的有限元模型,经计算获得了板材厚度沿径向的分布曲线以及等效塑性应变随时间的变化曲线。通过与单道次渐进成形数值模拟结果进行比较,得出两道次成形路径情况下板材成形极限有大幅提高,且变形量最大的区域出现在零件最底部的结论,经实验验证,两道次渐进成形有限元模型结果符合实际,能为板材渐进成形加工轨迹优化和成形复杂零件提供参考。

参考文献:

- [1] JESWIET J, MICARI F, HIRT G, et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54(2): 623-650.
- [2] 莫建华, 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, 19(4): 491-497.
MO JIAN-HUA, HAN FEL. State of the arts and latest research on incremental sheet NC forming technology [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 29(4): 491-497.
- [3] 松原茂夫. 板材の逐次张出し・绞り成形[C]//平成7年度塑性加工春季讲演会论文集. 东京:日本塑性加工学会, 1995: 209-210.
- [4] MICARI F, AMBROGIO G, FILICE L. Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of the art and future trends[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1/3): 390-395.
- [5] DEJARDIN S, THIBAUD S, GELIN J C. Finite element analysis and experimental investigations for improving precision in single point incremental sheet forming process[J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(1): 121-124.

- [6] HIRT G, AMES J, BAMBACH M. Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 203-206.
- [7] BAMBACH M, TALEB ARAGHI B, HIRT G. Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming [J]. Production Engineering, 2009, 3(2): 145-156.
- [8] KIM T J, YANG D Y. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(7): 1271-1286.
- [9] YOUNG D, JESWIET J. Wall thickness variations in single-point incremental forming[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2004, 218(11): 1453-1459.
- [10] ISEKI H, NAGANAWA T. Vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002(130/131): 675-679.
- [11] 周六如. 基于数控渐进成形技术的方形盒成形工艺[J]. 锻压技术, 2009, 34(4): 65-68.
ZHOU LIU-RU. Forming process of square box based on NC incremental forming technology[J]. Forging and Stamping Technology, 2009, 34(4): 65-68.
- [12] MA L W, MO J H. Three-dimensional finite element method simulation of sheet metal single-point incremental forming and the deformation pattern analysis[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 222(3): 1-8.
- [13] DUFLOU J R, VERBERT J, BELKASSEM B, et al. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step tool paths[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 253-256.
- [14] JACKSON K, ALLWOOD J. The mechanics of incremental sheet forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1158-1174.
- [15] EMMENS W C, VAN DEN BOOGAARD A H. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3688-3695.